

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Univerzitní studijní programy

Řídicí jednotky motorů

Control Units of Engines

2018

Lichnovský Marek

Zadání bakalářské práce

Student: **Marek Lichnovský**
Studijní program: B3943 Mechatronika
Studijní obor: 3906R006 Mechatronické systémy
Téma: **Řídicí jednotky motorů**
Control Units of Engines
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Proveďte rozdělení elektrických motorů, zaměřte se na jejich vlastnosti a možnosti řízení.
2. Proveďte návrh laboratorní úlohy řízení otáček motoru pro vybraný typ motoru včetně návrhu řídicí jednotky motoru.
3. Vytvořte řídicí jednotku motoru s rozhraním pro její konfiguraci a s programovou podporou pro distribuované systémy řízení.
4. Zhodnoťte dosažené výsledky a navrhňte směr dalšího řešení.

Seznam doporučené odborné literatury:

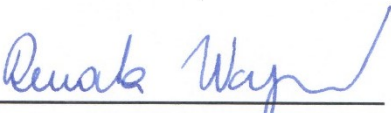
HRBÁČEK, Jiří. *Moderní učebnice programování jednočipových mikrokontrolérů PIC* [CD-ROM]. 2. díl, Stavíme se na vlastní nohy. Praha: BEN - technická literatura, 2007. ISBN 978-80-7300-137-7.
ROUBÍČEK, Ota. *Elektrické motory a pohony: příručka techniky, volby a užití vybraných druhů* [CD-ROM]. Praha: BEN - technická literatura, 2004. ISBN 978-80-7300-350-0.
TRZYNADLOWSKI, Andrzej Maria. *Control of induction motors* [online]. Amsterdam: Elsevier, 2007 [cit. 2017-11-16]. ISBN 978-0-12-701510-1.
VODA, Zbyšek. *Průvodce světem Arduina*. Bučovice: Martin Stříž, 2015. ISBN 978-80-87106-90-7.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.


Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Jaromír Škuta, Ph.D.**

Datum zadání: 08.12.2017

Datum odevzdání: 21.05.2018


doc. Ing. Renata Wagnerová, Ph.D.
vedoucí katedry




Ing. Zdeňka Chmelíková, Ph.D.
prorektorka pro studium

Místopřísežné prohlášení

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě dne 21.5.18



.....

Podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představenství a užití díla školního a § 60 – školní dílo
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do její skutečné výše).
- Beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

21.5.18
V Ostravě dne



.....

podpis studenta

Jméno a příjmení autora práce:

Marek Lichnovský

Adresa trvalého bydliště:

Hodoňovice 9, Baška 739 01

Poděkování:

Děkuji vedoucímu mé bakalářské práce panu doc. Ing. Jaromíru Škutovi, Ph.D., že si vždy udělal čas na konzultace, během kterých mi sdělil účinné rady, postřehy a připomínky, jenž jsem využil při zpracování mé bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat kolegům Lukáši Herudkovi, Rostislavu Řehákovi a Janu Bednářovi za poskytnuté prostředky, díky kterým se předešlo komplikacím při vypracovávání bakalářské práce.

Anotace Bakalářské práce

LICHNOVSKÝ, M. *Řídicí jednotky motorů*, bakalářská práce, Ostrava: VŠB – TUO, Univerzitní studijní programy, 59s., Vedoucí práce: Doc. Ing. Jaromír Škuta, Ph.D.

Cílem této práce je návrh řídicí jednotky pro mnou vybraný elektromotor. Je zde provedeno rozdělení elektrických pohonů, především podle řízení. Uvedeny jsou nejrozšířenější motory a je popsán princip jejich řízení. Vzhledem k rozmanitosti elektrických pohonů jsou rozepsány především motory, které jsou stále používané, nebo do nedávna ještě používané byly. To platí i o řídicích obvodech těchto motorů. Dále se práce zabývá návrhem a realizací řídicí jednotky pro BLDC motor, který jako výkonovou část používá volně prodejný regulátor otáček pro bezkartáčové motory s odběrem do 30 A. Pro možnost nasazení v distribuovaných systémech řízení komunikuje řídicí jednotka přes průmyslovou sběrnici RS – 485.

Klíčová slova

Elektrický pohon, Elektromotor, Řízení motoru, Řídicí jednotka, Atmel, ATmega168.

Anotation of Bachelor thesis

LICHNOVSKÝ, M. *Control Units of Engines*, bachelor thesis, Ostrava: VŠB – TUO, University program, 59p., Supervisor: Doc. Ing. Jaromír Škuta, Ph.D.

The aim of this work is to design a control unit for a selected electric motor. There is a repartition of electric drives mainly by driving. There are the most widely used engines where is described the principle of controlling. It is a large number of motors are described especially motors that are the most used, or have been used until recently. This is also applied to the control circuits of these motors. The project also deals with the design and realization of the BLDC motor control unit, which uses the ordinary speed controller for brushless motors up to 30 A. For communication through distributed systems, control unit communicates by the RS - 485 industrial bus.

Keywords

Electric drive, Electric motor, Motor control, Control unit, Atmel, ATmega168.

Obsah

Seznám použitých zkratek	9
Seznám použitých symbolů a značek	10
Úvod	11
1 Všeobecný popis elektromotorů	12
2 Střídavý motor	15
2.1 Jednofázové motory	15
2.2 Trojfázové motory.....	15
2.3 Asynchronní motor.....	16
2.4 Synchronní motor.....	17
2.5 Obvody pro řízení střídavých motorů	18
2.5.1 Střídače	18
2.5.2 Střídavé měniče napětí.....	19
2.5.3 Nepřímý měnič kmitočtu	20
3 Stejnosměrný motor	22
3.1 Stejnosměrný motor s cizím buzením	22
3.2 Stejnosměrný motor se sériovým buzením	24
3.3 Stejnosměrný motor s derivačním buzením	24
3.4 Stejnosměrný motor s kompaundním buzením.....	25
3.5 Obvody pro řízení stejnosměrných motorů.....	25
3.5.1 Usměrnovače	26
3.5.2 Pulzní měniče.....	27
4 Elektricky komutovaný motor.....	29
5 Krokové motory	32
5.1 Řízení krokových motorů.....	32
5.1.1 Unipolární a bipolární řízení.....	32
5.1.2 Čtyřtaktní řízení s magnetizací jedné a dvou fází.....	32

5.2	Budící obvody krokového motoru	35
6	Realizace jednotky pro řízení BLDC motoru	36
6.1	Modul pro konfiguraci řídicí jednotky	36
6.2	Řídicí jednotka	39
7	Návrh laboratorní úlohy	43
7.1	Technické prostředky	44
7.1.1	Modul pro konfiguraci řídicí jednotky.....	44
7.1.2	Řídicí jednotka.....	45
7.1.3	Použitý motor.....	45
7.1.4	Mikrokontrolér Atmel ATmega168.....	46
7.2	Měření laboratorní úlohy.....	50
8	Závěr a zhodnocení.....	55
	Seznam použité literatury	57
9	Přílohy.....	59

Seznám použitých zkratk

A/D	Analog/Digital	Analogově digitální
AC	Alternating current	Střídavý proud
BLDC	Brushless Direct Current	Bezkartáčový stejnosměrný
CAN	Controller Area Network	Sběrnice pro vnitřní komunikaci
DC	Direct Current	Stejnoseměrný proud
DPS (PCB)	Printed Circuit Board	Deska Plošných Spojů
EC	Electrically Commutated	Elektrická komutace
EEPROM	Electrically Erasable Programmable Read – Only Memory	Elektronicky vymazatelná paměť pro čtení
EMF	Electromotive Force	Elektromotorická síla
ESC	Electronic Speed Controller	Elektrické řízení otáček
GTO	Gate Turn Off	Tyristor řízený řídicí elektrodou
IGBT	Isolated Gate Bipolar Transistor	Bipol. tranzistor s izolovaným hradlem
IGCT	Integrated Gate Commutated Thyristor	Tyristor s integrovaným řídicím obvodem
LED	Light Emitting Diode	Elektroluminiscenční dioda
LIN	Local Interconnect Network	Místní propojovací síť
OLED	Organic Light – Emiting Diode	Organická luminiscenční dioda
PSC	Power Stage Controller	Řízení výkonového můstku
PWM	Pulse Width Modulation	Pulsně šířková modulace
SMT	Surface Mount Technology	Povrchová úprava
SPI	Serial Peripheral Interface	Externí sériová sběrnice
SRAM	Static Random Access Memory	Statická paměť

Seznám použitých symbolů a značek

A	Ampér
c	Konstrukční konstanta stroje
f_1	Napájecí frekvence
Hz	Hertz
M	Elektromagnetický moment
Mb/s	Megabajt za sekundu
Nm	Newton-meter
n_s	Synchronní otáčky
n_s	Otáčky rotoru
p	Počet polpárů
R_a	Odpor kotvy
rad/s	Radiány za sekundu
s	Skluz
U_a	Napájecí napětí
V	Volt
Wb	Weber
Φ	Magnetický tok
Ω	Ohm
ω_0	Rychlost na prázdno
$\Delta\omega_n$	Úbytek rychlosti
%	Procento

Úvod

V dnešní době si život bez elektřiny většina lidí nedokáže představit. Byť to někteří lidé mohou považovat za problém, tak ukazatelem vývoje je právě přechod od spalovacích motorů k elektrickým. Elektřina je kvalitní forma energie, kterou lze získat jednak z neobnovitelných zdrojů energie, které se nacházejí na Zemi, jako jsou fosilní paliva, nebo také z obnovitelných zdrojů energie, mezi které spadá vítr, slunce a jiné. Elektřinu lze efektivně rozvádět rozvodnými sítěmi na obrovské vzdálenosti a v místě určení ji přeměnit na požadovanou formu energie. To může být teplo, světlo, pohon pro elektromotory, nebo třeba využití při elektrochemických procedurách [1].

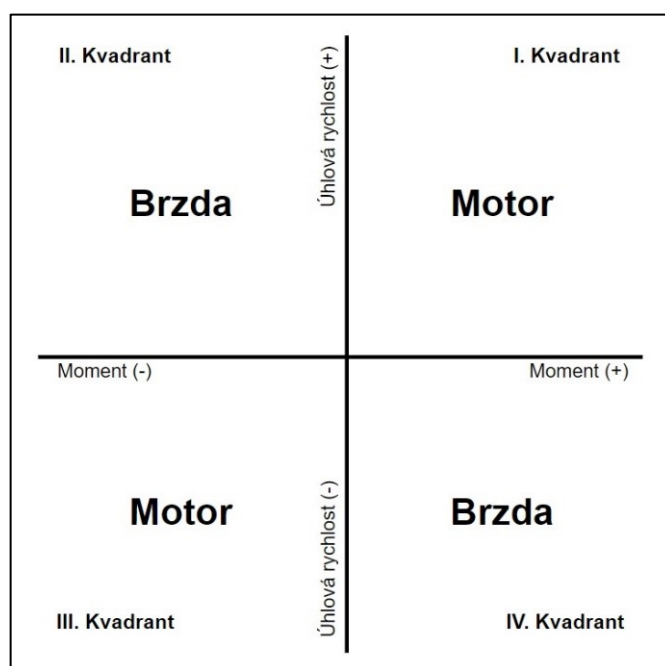
Elektrický pohon je soustava, vytvořena z vhodné kombinace elektrotechnických zařízení určených pro elektromechanickou přeměnu energie. Slouží k přenosu a zpracování signálů řídících tuto elektromechanickou přeměnu, jejíž vstupní řídící signály jsou učeny obsluhou či nadřazeným řídícím, regulačním nebo automatizačním členem, jejíž výstupní veličiny jsou parametry mechanického pohybu [1].

Byl zde zmíněn pojem řídící jednotka. S rozrůstajícím obsazením elektromotorů v různých procesech v automatizaci začaly vzrůstat i požadavky na řízení otáček motorů, čímž se rozumí změna směru a rychlosti otáčení, nebo případně vykonávání otáček v nastavených sekvencích apod. S postupem času se velmi rozšířilo řízení motoru pomocí mikroprocesorů, které skrze pulsně šířkovou modulaci ovládají výkonové můstky motorů. Je to způsob řízení, kdy konstantním stejnosměrným napájecím proudem, nebo napětím, je možné při správném sestavení řízení ovládat jak stejnosměrné, tak střídavé motory, případně speciální druhy motorů, jako jsou krokové, nebo motory s elektrickou komutací. S možností řízení motorů pomocí řídící jednotky roste procento zastoupení elektromotorů v průmyslu. To má vliv na to, že stále více firem se touto problematikou zabývá a vzhledem k sériovým výrobám klesá cena řídících jednotek.

1 Všeobecný popis elektromotorů

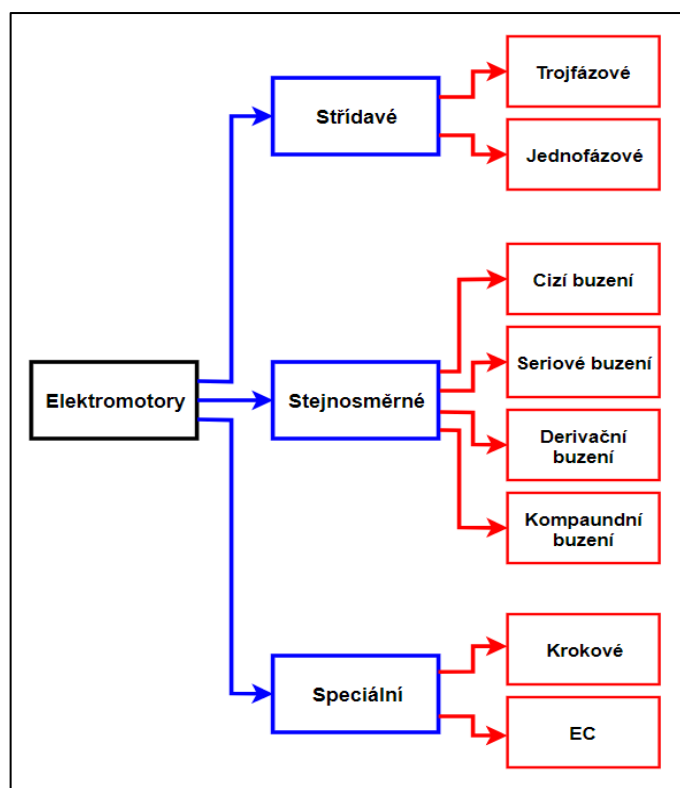
Princip spočívá v interakci magnetických polí rotoru a statoru. Ty mohou být tvořeny elektromagnety, nebo permanentními magnety. Základní strukturu elektromotoru lze zjednodušeně shrnout do čtyř základních částí. Elektrický a magnetický obvod, mechanická konstrukce a chlazení. Běžný motor má rotor, který se uložený v ložiskách otáčí v pevném statoru. Je možné se setkat s motory, které mají rozpoložení opačné, kdy rotor je vnější část motoru a otáčí se kolem statoru. Takovéto motory a další, které se od konvenčních liší jsou vyráběny na konkrétní účely, kde jsou tyto změny žádoucí. Výhody elektromotorů znatelně převažují nad nevýhodami, to je hlavní důvod, proč své uplatnění nachází v široké oblasti průmyslu [2], [3].

Elektromotory mohou pracovat ve čtyřech kvadrantech. To je znázorněno $M - \omega$ diagramem, který vyjadřuje závislost krouticího momentu na úhlové rychlosti, viz obrázek 1. Součinem momentu a úhlové rychlosti je vyjádřen výkon. Tento výkon může být kladný, kdy v takovém případě jsou kvadranty označovány jako motorické. V opačném případě, tedy když je výkon záporný, jsou kvadranty označovány jako brzděné. V I. a III kvadrantu se směr rotace shoduje se směrem momentu, výkon je kladný, motory jsou tedy v motorickém režimu. V II. a IV. je směr rotace v protisměru momentu, jedná se tedy o brždění. Zmíněné brždění může být u elektromotorů regenerativní, to znamená že se vytváří využitelná elektrická energie bržděním (motor je v generatorickém režimu) [2], [3].



Obrázek 1: $M - \omega$ diagram [2]

Rozdělení elektromotorů je dost obecný požadavek, podrobnost rozdělení závisí na zvolené rozlišovací úrovni. V tomto případě je rozdělení členěno podle napájecí energie daného motoru, od čehož se odvíjí i jejich řízení.



Obrázek 2: Základní Rozdělení elektromotorů [2]

Rozdělení bylo provedeno na stejnosměrné motory, střídavé motory a motory, které se strukturou podobají střídavým motorům, ale jsou napájeny stejnosměrným proudem, proto byly zařazeny do skupiny nazvané speciální. Další podskupiny byly vytvořeny podle vlastností konkrétních motorů. U stejnosměrných motorů je důležitý způsob buzení a u střídavých motorů se rozlišuje, zda mají skluz, či nikoliv, tedy jestli jsou synchronní či asynchronní.

Aplikace elektrických pohonů poskytuje mnoho výhod v porovnání se spalovacími motory. Mezi tyto výhody můžeme zařadit možnost konstrukčního i funkčního přizpůsobení dle požadavku. Motory lze vyrábět v širokém rozsahu výkonů (10^{-3} W – 108 MW), momentů (10^{-3} Nm – 10^6 Nm) a otáček (ot/min – 10^5 ot/min). Dále jejich zařazení do provozu je příznivé, jelikož v případě bezvadného chodu nejsou zdrojem vibrací, zplodin a mají nízkou úroveň hluku. Jsou rychle provozuschopné a samotná údržba, obsluha, řízení a ovládání jsou jednoduché. Elektromotory jsou vysoce účinné a je

možné je krátkodobě přetížit. Přetížení závisí na dimenzování motoru. Kritická je v tomto případě teplota. Takovéto přetěžování zkracuje životnost motoru, která bývá desítky let [2], [3].

Seznám nevýhod je o poznání kratší. Pochopitelně různé typy elektromotorů mají různé nevýhody, ale obecně všechny elektromotory jsou závislé na dodávce elektriny. Okamžité zastavení zatíženého motoru z důvodu přerušení přívodu energie může uškodit elektromotoru i tomu, co motor pohání, proto je potřeba uvažovat dočasný záložní zdroj energie. To jsou ovšem navýšené finance i hmotnost motoru. Další problém, který omezuje vytvářet elektromotory malé a výkonné, je hodnota nasycení materiálu. Tento stav je možné vypočítat z hysterezní křivky magnetického materiálu, která vyjadřuje závislost magnetizace a intenzity magnetického pole. V případě, že dojde k nasycení, tak přes zvyšování intenzity magnetického pole se magnetizace už nenavýší [2], [3].

2 Střídavý motor

Nebo také střídavý stroj je elektromotor připojený na střídavé napětí, které může být jednofázové, nebo vícefázové. V minulosti byly tyto motory používány výhradně v aplikacích, kde nebylo zapotřebí řídit otáčky. V dnešní době už mohou být tyto motory používány v různých aplikacích díky nástupu frekvenčních měničů.

2.1 Jednofázové motory

Pro správnou funkci motoru je zapotřebí vytvořit točivé magnetické pole. To může být u jednofázových elektromotorů problém. Jelikož se třífázové motory točí díky třem fázově posunutým proudům (každý o 120° elektrických), tak musíme statorové vinutí doplnit o další pomocné fázově posunuté vinutí, resp. je to nezbytné pro rozběhnutí motoru. Kdybychom motor manuálně roztočili, začalo by se indukovat pohybové napětí i bez rozběhového vinutí. Proud rotoru potom vybudí magnetický tok rotoru, který je s polem statoru posunut o méně, než 180° a vytvoří se točivý moment [1].

Pro samostatné roztočení motoru je tedy zapotřebí pomocná fáze, ta může být zapojena po celou dobu běhu, nebo se po rozběhu odpojí (odstředivým vypínačem atp.). Získání fázově posunutých proudů mezi hlavním a pomocným vinutím dosáhneme pomocí posunutí fáze pomocného vinutí, například zapojením činného odporu, tlumivky, nebo kondenzátoru do odvodu. Motory s tímto řešením mají obtížný rozběh, což limituje zatížení při rozběhu [1].

Dalším řešením je jednofázový elektromotor se stíněným polem. V tomto případě statorové vinutí není uloženo v drážkách, ale je na vyniklých pólech. Každý pól má výřez, z něhož je jeden závit nakrátko spojený. Přivedením proudu na vinutí pólu se vytvoří magnetický tok, který je opačného smyslu než magnetický tok vzniklý na závitu nakrátko. Toto je potřebný impuls k rozběhu motoru. Jednoduše řečeno fázové zpoždění je realizováno jednoduchými měděnými smyčkami. Záběrný moment je malý. Tento druh rozběhu se používá například u ventilátoru [1].

2.2 Trojfázové motory

Tyto motory mají tři budicí vinutí. Každé je napájeno proudem, fázově posunutým vždy o 120° . To zapříčiní vznik točivého magnetického pole. Podle provedení rozlišujeme dvě základní provedení střídavého trojfázového motoru, a to synchronní motor a asynchronní (indukční) motor. O tom, který motor je který rozhoduje, zda se rotor otáčí současně (synchronně) s rotací magnetického pole, nebo jestli se zpožďuje (má tzv. skluz).

2.3 Asynchronní motor

Často nazýván jako indukční motor. V drtivé většině se objevuje pro třífázové napájení, ovšem malé motory můžou být jednofázové. V pohonech je velmi rozšířený pro své dobré vlastnosti, jako jsou výroba těchto motorů v širokém rozsahu výkonů a spolehlivost, která je dána jednoduchou konstrukcí. Další rozhodující skutečnost je relativně nízká cena, jelikož jsou tyto motory velmi rozšířené a jsou vyráběny sériově. Ovšem najdou se i nevýhody, mezi které patří poměrně složitá regulace. To je taky důvod, proč donedávna tyto motory pracovaly především na pozicích, kde není vyžadovaná regulace otáček. Dnes se však stále více firem zabývá výrobou a vývojem frekvenčních měničů.

Funkce spočívá v točivém magnetickém poli, které vzniká ve vzduchové mezeře mezi statorem a rotorem. Vzhledem k napájení motoru ze souměrné třífázové soustavy je i vinutí statoru trojfázové. Jednotlivé fáze jsou navzájem posunuty o 120° a vytváří magnetická pole. Na tyto pole reagují magnetická pole rotoru, a to zapříčiní jeho rotační pohyb. V zatíženém stavu však otáčky magnetického pole statoru a mechanické otáčky rotoru nemohou být stejné, jelikož by se neindukovalo napětí. Proto jsou mechanické otáčky rotoru nižší než otáčky magnetického pole statoru. To je nazýváno skluz [1], [2].

Aby bylo jasné, jakým způsobem se dají řídit otáčky motoru je potřeba vyjádřit výpočet úhlové rychlosti. Jelikož se jedná o asynchronní motor, vyjádří se synchronní otáčky, tedy otáčky magnetického pole statoru (1), které ve spojení se skluzem dávají výsledné otáčky rotoru (2).

$$n_s = \frac{60 \cdot f_1}{p} \quad (1)$$

$$n = n_s - \frac{s \cdot n}{100} \quad (2)$$

kde: f_1 – napájecí frekvence (Hz),

p – počet polpárů (-),

s – skluz (%),

n_s – otáčky magnetického pole statoru – synchronní otáčky (ot/min),

n – otáčky rotoru (ot/min).

V rovnici (1) se ve jmenovateli udává počet polpárů. Jejich změnou tedy bude docházet ke změně otáček. Tento způsob je založený na přepínání jednotlivých statorových vinutí, které mají různý počet polpárů. Tato volba řízení otáček motoru však zvětšuje rozměry motoru, jelikož jednotlivá statorová vinutí jsou nad sebou umístěna ve statorových drážkách. Tímto způsobem lze dosáhnout libovolného počtu polpárů [2].

Při změně napájecího napětí se záběrný proud mění lineárně a maximální spolu se záběrovým momentem se mění kvadraticky. Hodnota skluzu zvratu se však nemění. Pracovní oblast asynchronního motoru v motorické oblasti se nachází v oblastní malých skluzů. Změna momentu motoru i velikost ustálené hodnoty rychlosti pohonu změnou napájecího napětí je možné, ale pouze v rozmezí od nulového skluzu, po skluz zvratu. Ten u asynchronních motorů činí pouze pár procent. Proto lze otáčivou rychlost pohonu měnit pouze v malém rozsahu. Lze tedy říci, že zvýšením hodnoty skluzu zvratu se zvýší i rozsah změny rychlosti pohonu. Toho lze docílit použitím motoru s velkým odporem rotorového vinutí nebo použít kroužkový motor s trvale zařazeným odporem do rotorového obvodu. Zvýšením odporu však dochází k maření většího množství energie v teplo. Při tomto způsobu řízení je tedy důležité chlazení. I přes nevýhody je toto řízení používáno například v malých oběhových čerpadlech. Jedná se o jednoduché a spolehlivé řízení rychlosti. Pro změnu napájecího napětí se používá nejčastěji třífázový měnič napětí [2].

Při pohledu na rovnici (1) můžeme vidět, že synchronní otáčky n_s jsou přímo úměrné pouze napájecí frekvenci f_1 . To je v dnešní době možné vzhledem k rozvoji výkonové a řídicí elektroniky. Používají se frekvenční měniče, podobné, jako u asynchronních motorů, ovšem napájecí zdroj musí být vybaven příslušnými obvody, jinak by se synchronní motor při konstantní frekvenci nerozběhnul. Otáčky se sice při rostoucí zátěži nemění, ale také nelze zatěžovat motor do nekonečna. Překročením maximálního momentu, který roste se zatěžovacím úhlem mezi statorem a rotorem, se motor zastaví a je ve stavu nakrátko, čímž odebírá velký proud [5].

2.4 Synchronní motor

Synchronní stroje mohou pracovat ve všech čtyřech kvadrantech $M - \omega$ diagramu viz obrázek 2. Tyto elektrické stroje byly nejprve používány pro výrobu střídavé elektrické energie. Dva důvody zapříčinily, že synchronní stroje se začaly používat jako elektromotory. Jedním z důvodů byla kompenzace jalového výkonu v síti, tedy snížení ztrát energie ve vedeních. Dalším důvodem by narůstající zkratový výkon v místě připojení spotřebičů. Nejprve tyto motory byly určeny do provozu, kde nebylo předpokládáno jejich

časté spínání. Měly pracovat s konstantní rychlostí a s poměrně stálým zatížením. Avšak díky výkonovým elektronickým měničům je možné rychlost synchronních motorů regulovat. Stator synchronního motoru je shodný se statorem asynchronního motoru, tedy obvykle vybaven střídavým trojfázovým vinutím. Rozdíl nastává u rotoru, ten je u menších motorů tvořen z permanentních magnetů a u větších motorů je soustava pólů buzena stejnosměrným proudem. Přivedením střídavého napájecího napětí do motoru se rotor začne otáčet synchronními otáčkami, tedy otáčí se shodně s točivým magnetickým polem statoru. Z toho vyplývá nulový skluz. Právě podle synchronního otáčení dostal motor své jméno. Synchronní motory dnes můžeme najít v průmyslu ve vysoko výkonových aplikacích. Příkladem mohou být velké vodní čerpadla, nebo kompresory. Můžeme je také najít ve vodních elektrárnách, kde pracují s výkony stovek megawattů [2].

2.5 Obvody pro řízení střídavých motorů

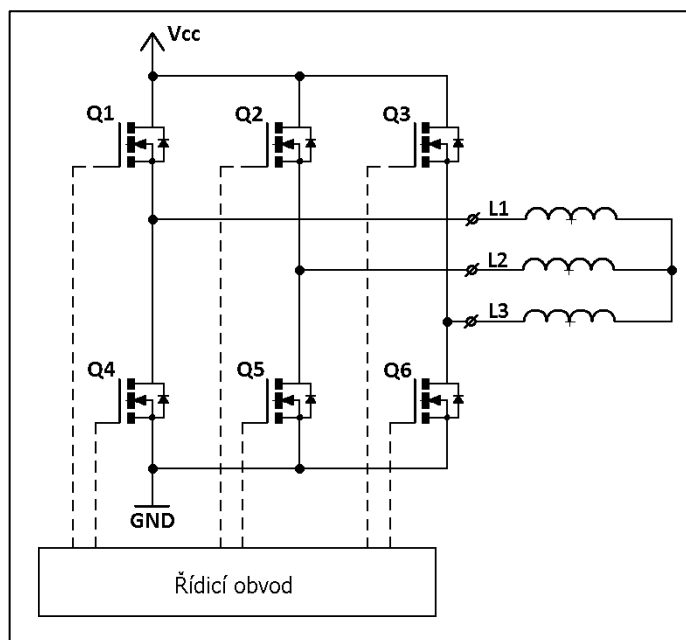
Zde jsou uvedena praktická řešení používaná pro řízení otáček střídavých motorů. Jsou zde zmíněny principy a zapojení střídačů, střídavých měničů napětí a nepřímých frekvenčních měničů.

2.5.1 Střídače

Jsou to obvody pro převod stejnosměrného napětí či proudu na střídavé. Nejčastěji se vyskytují, jako člen nepřímých napětěových střídačů, ovšem své zastoupení mají i jinde, například jsou střídače součástí zdroje, který má napájet střídavé spotřebiče z baterie. Nejsnáze si lze střídač představit jako uskupení spínačů, které střídavě připojují k zátěži zdroj stejnosměrného napájení. S nastavenou frekvencí spínání se mění i frekvence výstupního signálu [8].

Střídače mohou být napětěového nebo proudového typu. Tyto dva typy se liší použitými spínacími prvky. Napětěový střídač používá tranzistory (bipolární, unipolární, IGBT, ...), kdežto proudové střídače využívají tyristory, které jsou označovány jako GTO (z anglického Gate Turn Off). Ty však měly značné výkonové ztráty, takže je v dnešní době nahradily tzv. IGCT (z anglického Integrated Gate Commutated Thyristor). Díky vypínatelným polovodičovým součástkám se střídače v elektrických obvodech rozšířily. Kdysi se používaly proudové střídače pro svoji jednoduchost při vypínání tyristoru a vyšší odolnost vůči zkratu. V dnešní době se vyrábějí především napětěové střídače [3], [8].

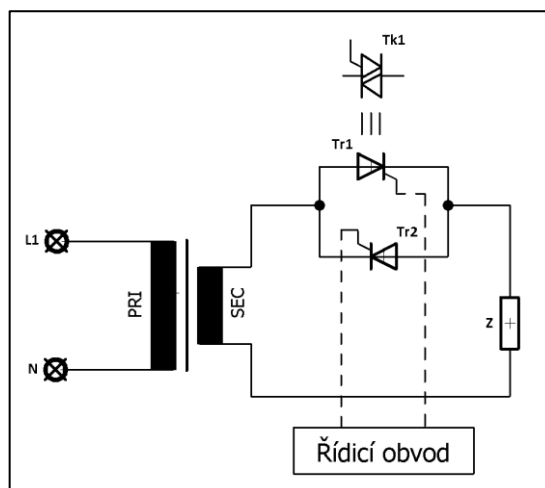
Nejběžnější jsou střídače v provedení jednofázovém a trojfázovém. Na obrázku 3 je znázorněno zapojení trojfázového střídače, kdy jako spínací prvky byly použity unipolární tranzistory (Q1 – Q6), s ochrannou diodou. Řízení spínacích prvků probíhá přes stejnosměrný obvod, vykreslený v obrázku 3 jako řídicí obvod.



Obrázek 3: Trojfázový střídač [8]

2.5.2 Střídavé měniče napětí

Jde o způsob řízení rychlosti otáček jednofázového i trojfázového střídavého motoru. Princip spočívá ve změně efektivní hodnoty napětí, čehož je dosaženo použitím spínacích prvků, jako jsou triaky (Tk1), antiparalelně zapojené tyristory (Tr1 a Tr2), nebo kombinace diod. Tyto prvky se otevírají v případě přivedení řídicího impulsu. Doba, po kterou je prvek otevřen určuje efektivní hodnotu napětí. Jedná se tedy o způsob řízení pomocí změny napětí, přičemž se zachovává hodnota frekvence. Z hlediska řízení motoru lze těmito obvody řídit motory malých až středních výkonů. Na obrázku 4 se nachází jednofázový měnič střídavého napětí [8].



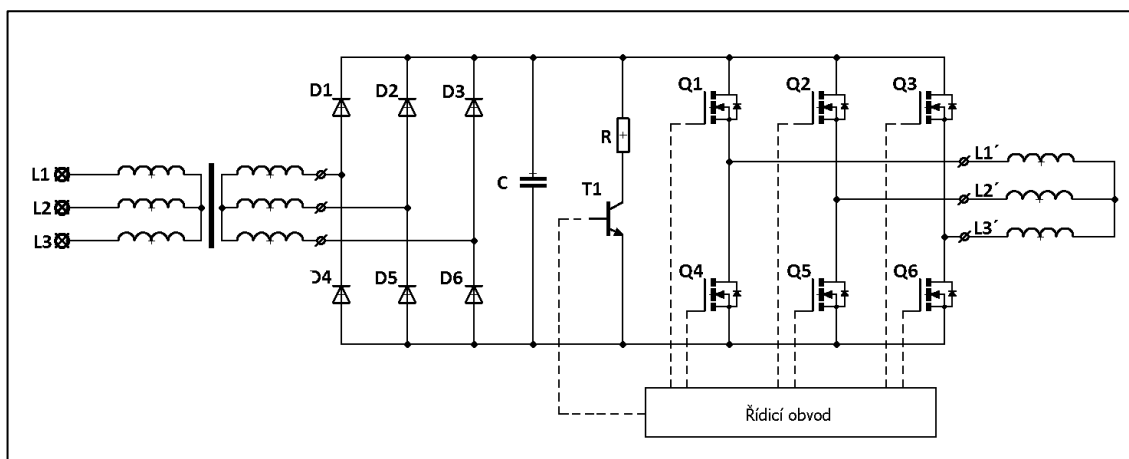
Obrázek 4: Měnič střídavého napětí [8]

2.5.3 Nepřímý měnič kmitočtu

V kapitolách zabývajících se způsobem řízení střídavých motorů bylo uvedeno, že rychlost je možné měnit velikostí napájecí frekvence. K tomu slouží právě měniče kmitočtu.

V současné době se jedná o nejpoužívanější metodu řízení rychlosti asynchronních motorů. Celý měnič se skládá z usměrňovače, stejnosměrného obvodu a střídače. Vzhledem k přítomnosti stejnosměrného obvodu je frekvence vstupního a výstupního signálu na sobě zcela nezávislá. Nepřímé měniče kmitočtu jsou vyráběny ve frekvenčním rozsahu od desetin Hz až po stovky Hz. Usměrňovač se volí diodový, dříve se používaly tyristorové usměrňovače, ovšem hodnotu výstupního napětí je již možné měnit pomocí PWM [3], [8].

Jak již bylo zmíněno v kapitole popisující střídače, může se vyskytovat střídač napětěový, nebo proudový. V závislosti na zvoleném typu se mění i stejnosměrný obvod mezi usměrňovačem a střídačem. V případě použití napětěového střídače se používá paralelně připojený velký kondenzátor, který plní funkci zdroje špičkové energie. Paralelně přiřazený odpor je zde pro maření energie, jelikož energie, která je do měniče dodávána v případě generátorického brzdění, by u kondenzátoru způsobila rychlý a značný nárůst napětí, dále nastává problém s neschopností diodového usměrňovače přijmout zpět energii. Jestliže je použit proudový střídač, tak se ve stejnosměrném sériovém obvodu nachází tlumivka. Proudový střídač potřebuje konstantní proud, a právě tlumivka zajišťuje jeho vyhlazení [8].

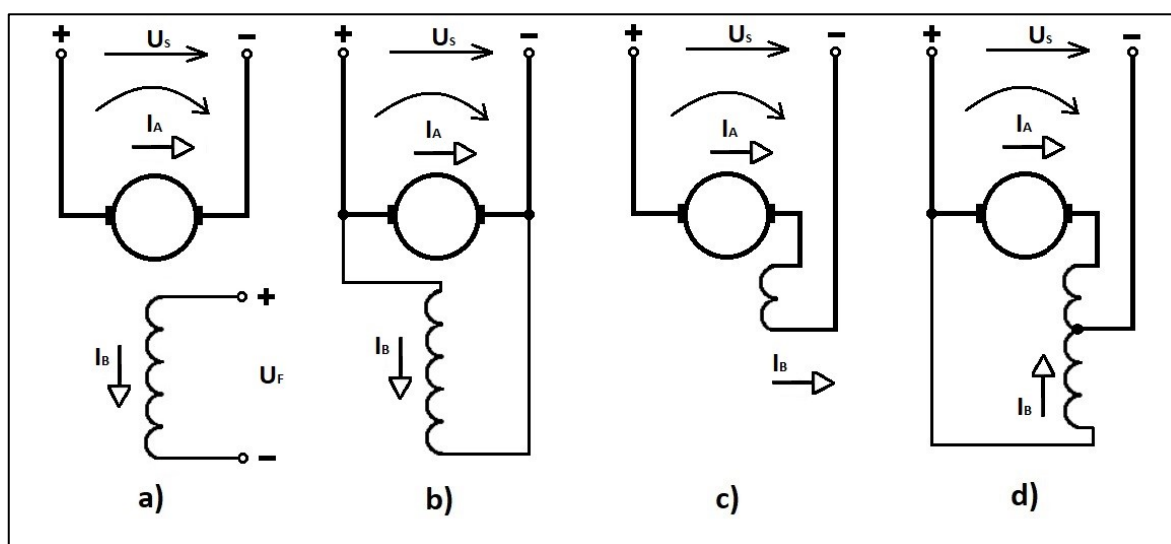


Obrázek 5: Nepřímý měnič kmitočtu s napět'ovým střídačem [8]

3 Stejnosměrný motor

Tyto elektrické pohony jsou spjaty s rozvojem využití elektrických pohonů ve svých počátcích. Své zastoupení v oblasti pohonů stále mají, ovšem při návrhu pohonu se stejnosměrnými motory příliš neuvažuje. Pro složitější konstrukci, vyšší pořizovací náklady a nižší provozní spolehlivost, která je dána použitím komutátoru, se postupně přechází od stejnosměrných pohonů ke střídavým, nebo k pohonům s elektrickou komutací. Z oblasti regulovaných pohonů byly stejnosměrné pohony nahrazeny asynchronními střídavými motory a v oblasti servopohonů byly nahrazeny synchronními střídavými motory [4], [5].

Stejnosměrné pohony se vzhledem k jejich buzení dělí na motory s cizím buzením, se sériovým buzením (trakční), s derivačním buzením a s kompaundním buzením, viz obrázek 6.



Obrázek 6: Buzení stejnosměrného motoru a) cizí, b) paralelní, c) sériové, d) kompaundní [9]

3.1 Stejnosměrný motor s cizím buzením

Jak již bylo zmíněno, stejnosměrné stroje jsou nahrazovány střídavými, ovšem stále zde jsou vlastnosti, kterými stejnosměrný stroj, konkrétně s cizím buzením dominuje. Mezi takové vlastnosti patří například snadná řiditelnost. Snadná struktura regulačních obvodů umožňuje jednoduché řízení pohonu, v obou smyslech otáčení při širokém regulačním rozsahu.

Možnosti řízení rychlosti otáčení motoru si lze uvědomit vyjádřením rovnice (3), která úhlovou rychlost popisuje [5], [2].

$$\omega = \frac{U_a}{c \cdot \Phi} - \frac{R_a \cdot M}{(c \cdot \Phi)^2} = \omega_0 - \Delta\omega_n \quad (3)$$

kde: c – konstrukční konstanta stroje,

Φ – magnetický tok,

U_a – napájecí napětí,

R_a – odpor kotvy,

M – elektromagnetický moment,

ω_0 – rychlost na prázdkno,

$\Delta\omega_n$ – úbytek rychlosti.

Je zřejmé, že úhlovou rychlost můžeme měnit třemi způsoby. První způsob je změnou napájecího napětí, druhý způsob je změnou odporu kotvy přiřazením vnějšího odporu a poslední způsob je změnou magnetického toku, čehož se docílí změnou budícího napětí [5].

V dnešní době se využívá k řízení rychlosti otáčení změna napájecího napětí, nebo změna magnetického toku (odbuzováním). Způsob řízení, kdy dochází k změně odporu kotvy se nevyužívá vzhledem k maření energie, konkrétně maření elektrické energie v teplo. Jedná se tedy o ne hospodárný způsob řízení [5], [2].

Při řízení rychlosti změnou napětí se dosáhne jmenovitých otáček, které nastanou při jmenovitém napětí. Tuto hodnotu napětí nelze překročit, to znamená, že rychlost otáčení lze vůči jmenovitým otáčkám napájecím napětím pouze snižovat. Jak je z rovnice (3) vidět, změnou napětí se nemění velikost úbytku napětí, tedy průběhy mechanické charakteristiky vyjadřující závislost momentu na úhlové rychlosti budou při snižování rychlosti rovnoběžné [5].

Pro získání vyšších otáček při menších momentech se používá řízení rychlosti otáčení změnou magnetického toku, tedy změnou budícího napětí. Lze takto rozsah

regulace zvětšit. Ovšem při pohledu do rovnice (3) je patrné, že se bude se změnou rychlosti na prázdno měnit i úbytek rychlosti. Průběhy mechanických charakteristik tedy nebudou rovnoběžné [2].

3.2 Stejnosemřný motor se sériovým buzením

V tomto případě je budicí vinutí zapojené do série s kotvou a protéká jím budicí proud kotvy. To znamená, že magnetický tok je závislý na budicím proudu, a tedy i na momentu stroje. Závislost úhlové rychlosti na momentu tohoto motoru je v některých aplikacích pokládána za výhodu, například u elektrických pohonů vozidel. V tomto případě se používá pojem trakční motor [2].

Tento druh motoru se jako pohon vozidel používá již dlouho a pro své dobré vlastnosti se stále rozšířeně používá. Tento motor je charakteristický velkým záběrným momentem při nízkých otáčkách. Moment parabolický klesá s otáčkami. To odpovídá potřebám elektrických trakčních motoru, kdy je vyžadovaný velký moment pro rozjezd a poté stačí menší moment, pro udržení otáček. Vzhledem k velké indukčnosti budicího vinutí je průběh přechodových dějů pomalejší [2].

Stejnosemřné motory sériově buzeny jsou také v mnohem menším provedení, kdy se jím říká univerzální motorky. Je to malý komutátorový motorek, který je možné napájet jak ze stejnosemřného, tak ze střídavého napájecího zdroje. Tyto motorky dosahují až 3000 otáček za minutu. Je možné je najít například ve vrtačkách, či kuchyňských mixérech [2].

Rozběh těchto motorů je možný pomocí změny napájecího napětí. Takový způsob je bezztrátový. Další variantou je zařazení odporu do série s kotvou. Tento způsob se nazývá odporový rozběh. Je starý a potýká se se ztrátami v odporu.

Brzdění je možné dvěma způsoby. Buď se energie způsobena setrvačností hmoty vrací zpět do napájecího zdroje, jde tedy o rekuperační brzdění nebo se tato energie maří v teplo. Tomuto způsobu se říká odporové brzdění [2].

3.3 Stejnosemřný motor s derivačním buzením

V tomto případě je budicí vinutí připojeno ke kotvě paralelně, proto se také tomuto motoru říká motor s paralelním buzením. Princip je následující. Po připojení svorek motoru k napájení se vstupní proud rozdělí mezi budicí vinutí a rotorové vinutí. Proud, který prochází budicím vinutím, vytvoří stálé magnetické pole v prostoru kotvy motoru. Proud, který teče vinutím rotoru, vytváří magnetické pole rotoru. V tomto stavu nastává interakce dvou magnetických polí, které způsobí pootočení rotoru. Tento impuls způsobí dostatečné

pootočení k tomu, aby komutátor změnil směr proudu ve vinutí rotoru, a díky tomu se rotor začne otáčet [9].

Tyto motory jsou známy svojí stálostí otáček nezávisle na zatížení a nepoužívají se příliš v aplikacích, kde je požadovaná regulace rychlosti.

Regulace rychlosti je možná následujícími způsoby. Buďto je připojen rezistor s proměnným odporem sériově k vinutí rotoru. Tento způsob regulace však umožňuje pouze snižovat otáčky. Na otáčky na prázdkno toto řešení nemá vliv. Druhá možnost je použití bočníku, přes který by docházelo ke změně budicího proudu, a tedy ke změně magnetického toku. Zvýšením budicího magnetického toku se sníží otáčky na prázdkno a zmenší se pokles otáček při rostoucím zatížení. V případě snížení budicího magnetického toku se otáčky na prázdkno zvýší, ale také při rostoucím zatížení rychleji klesají otáčky [9].

V praxi je také možné narazit na motor s permanentním magnetem. V tomto případě zde jde o nahrazení budicího vinutí stálým (permanentním) magnetem. Konstrukce tohoto motoru se zjednoduší. Svými vlastnostmi v podstatě odpovídá právě paralelnímu motoru.

3.4 Stejnoseměrný motor s kompaundním buzením

Také se těmto motorům říká motory se směšeným buzením. Název vznikl, jak to u stejnoseměrných motorů bývá, od zapojení buzení. Nachází se zde sériové i paralelní (derivační) buzení. Toto řešení má předejít problémům, které mají motory pouze se sériovým, nebo paralelním buzením [9].

Vlastnosti motoru se odvíjí od způsobu buzení. Pokud obě budicí vinutí působí magnetickým tokem souhlasně, potom proti derivačnímu motoru zajišťuje tento způsob buzení větší záběrový moment a také nehrozí roztržení při odlehčení. V porovnání se sériovým motorem se méně snižují otáčky při rostoucím zatížení. Pokud působí budicí vinutí proti sobě, motor poskytuje stálé otáčky při proměnlivém zatížení [9].

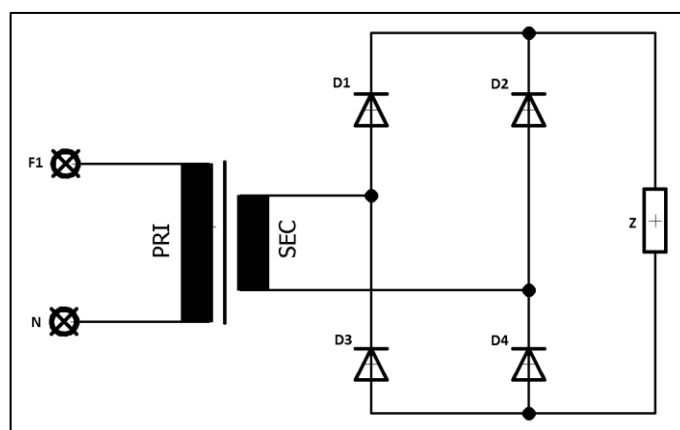
3.5 Obvody pro řízení stejnoseměrných motorů

Řízení rychlosti se nejčastěji provádí pomocí změny napájecího napětí. Další možnosti jsou změna předřazeného odporu kotvy, nebo změna budicího proudu. Jsou dva způsoby, jak měnit napájecí napětí pro stejnoseměrné motory. Buďto je třeba převést střídave napětí na stejnoseměrné, k čemuž se používají usměrňovače, nebo se mění hodnota vstupního stejnoseměrného signálu pomocí pulzní měniče [3], [5].

3.5.1 Usměrňovače

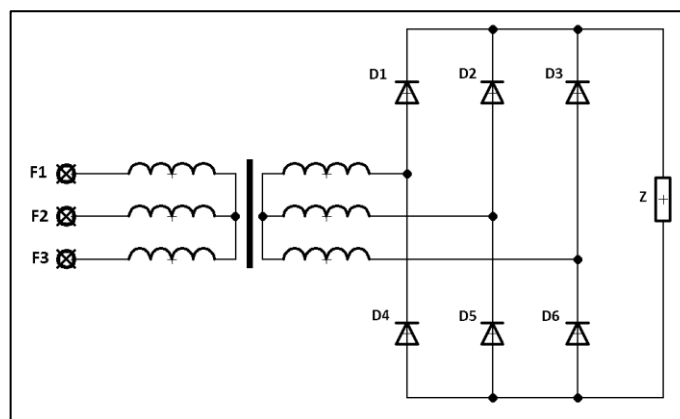
Jedná se o polovodičový měnič, do kterého vstupuje střídavý proud a mění jej na stejnosměrný. Je to dlouho používaný měnič, který lze rozdělit z mnoha hledisek. Podle použitých polovodičových součástek je dělíme na řízené (použití tyristorů) a neřízené (použití diod). Podle počtu fází mohou být jednofázové, dvoufázové, trojfázové, až n – fázové. A podle zapojení mohou být uzlové, nebo můstkové. Teorie okolo usměrňovačů je rozsáhlá, jsou zde proto uvedeny dva velmi často používané usměrňovače, kterými jsou jednofázový a trojfázový můstkový usměrňovač [8].

Jednofázový můstkový usměrňovač využívá kladnou i zápornou půlvlnu sinusového signálu napájecího napětí a vytváří z něj absolutní hodnotu. Jedná se o čtveřici diod, kdy dvě usměrňují kladnou půlperiodu a dvě zápornou. Dnes je tento usměrňovač běžně k dostání jako integrovaný obvod, který nepotřebuje speciální provedení napájecího transformátoru. Realizace, jsou použity diody, se nazývá Graetzův můstek [3], [5], [8].



Obrázek 7: Schéma zapojení jednofázového neřízeného můstkového usměrňovače [8]

Trojfázový můstkový usměrňovač je nejpoužívanější v případech, kdy je k dispozici trojfázová napájecí síť. Vytváří usměrněné napětí z šesti sinusových průběhů. Tři sdružených efektivních napětí a tří sinusových napětí posunutých o 180° oproti sdruženým. Výsledné napětí je tvořeno obálkou všech těchto šesti průběhů. V případě použití trojfázových usměrňovačů je výsledné napětí méně zvlněno oproti jednofázovým [3], [5].



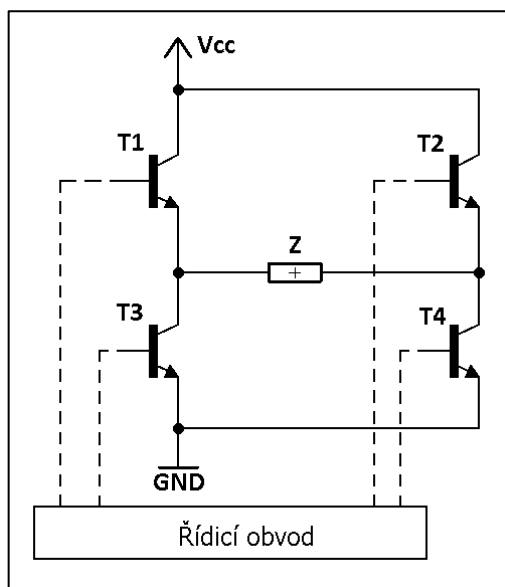
Obrázek 8: Schéma zapojení trojfázového neřízeného můstkového usměrňovače [8]

3.5.2 Pulzní měniče

Také nazývané stejnosměrné měniče. Používají se pro řízení střední hodnoty stejnosměrného napětí, což znamená, že do měniče vstupuje konstantní stejnosměrné napětí a vystupuje napětí s říditelnou střední hodnotou, tedy regulované. Nejčastější využití se vyskytuje u trakčních pohonů, pohonů napájených z akumulátoru a v dalších případech, kde je k dispozici stejnosměrná napájecí síť [3], [5].

Princip spočívá ve spínání prvků, přes které je napájecí napětí připojené k motoru. Amplituda pulzu je daná napájecím napětím. Spínací prvek, běžně IGBT, je otevřen pulzem na určitou dobu. Během této doby roste napětí rychlostí, která je daná časovou konstantou. Poté se prvek vypne a napětí opět klesá. Množstvím sepnutí a délkou doby sepnutí se určuje střední hodnota napětí [3], [5].

Pro možnost změny polarity se používá čtveřice spínacích prvků tvořící plný H-můstek. Podle kombinace sepnutí se rozhodne, kterým směrem poteče budící proud, tedy do jaké strany se bude motor otáčet. Na obrázku 9 spolu pracují tranzistory T1, T4 a T2, T3. Obvod pracuje tak, že jeden z dvojice prvků je trvale otevřený a ten druhý se otevírá pulzy podle potřeby. Motor může být tedy trvale připojený na kladnou větev napájecího zdroje (například skrze T1) a spínáním spínacího prvku (T4), který připojuje motor k záporné větvi, se obvod uzavírá [3], [5].



Obrázek 9: Pulzní měnič tvořený bipolárními tranzistory [8]

4 Elektricky komutovaný motor

Také se tento motor nazývá bezkartáčový stejnosměrný motor, z tohoto názvu vznikla zkratka BLDC (z anglického Brushless Direct Current), nebo další označení je EC (z anglického Electrically Commutated).

Tento druh motoru jsem zvolil pro svou práci jako akční člen, ke kterému je zapotřebí vytvořit řízení. Jedná se o typ synchronního motoru, to znamená, že magnetické pole generované statorem a magnetické pole generované rotorem má stejnou frekvenci. To znamená, že nemají skluz, což má vliv například na setrvačnost motoru. V této práci je použit BLDC motor v třífázovém provedení, to je obecně nejrozšířenější provedení. Mohou se vyskytovat i jako jednofázové, nebo dvojfázové [7].

U stejnosměrných komutátorových motorů je nejslabším místem komutátor. Se správnou funkcí komutátoru je spojována také spolehlivost stejnosměrných motorů. Mnoho zdrojů uvádí, že problém s kluzným kontaktem je vyřešen, ovšem to platí pouze pro některé případy, hlavně u velkých motorů. Pro malé stejnosměrné motory to je stále problém. Problém s komutací u motoru menších výkonů řeší tedy elektrická komutace. Pojem komutace v tomto případě už nemá nic společného s kartáčovou komutací [7].

Konstrukce těchto motorů je opačná v porovnání s klasickými komutátorovými motory. V tomto případě je budící vinutí rotující část a pevné vinutí je satorové. Konstrukčně motor připomíná synchronní motor, kdy sator je třífázové vinutí zapojené do hvězdy a rotor je tvořen permanentními magnety. Magnetické pole satoru a magnetické pole rotoru mají stejnou frekvenci [7].

K napájení a zároveň řízení se používá řídicí jednotka v zapojení třífázového můstku, který je osazen IGBT tranzistory se zpětnými diodami. Tranzistory se ovládají pomocí pulsně šířkové modulace. Tyto motory mohou mít přímo zabudované tištěné spoje pro napájení a řízení. Je patrné, že kartáčová komutace musela být nahrazena jiným způsobem. V tomto případě je to zajištěno magnety pro snímání polohy, na které reagují Hallovy sondy a zjišťují tak informaci o poloze rotoru. Je možné také použít jiné metody pro zjištění polohy. Enkodéry, resolvery, případně se používá bezsenzorová zpětná vazba EMF [7].

Tyto motory se vyznačují vysokou účinností, dlouhou životností, velkým rozsahem rychlosti a mnoha dalšími vlastnostmi. Pro lepší představu je v tabulkách 1 a 2 provedené

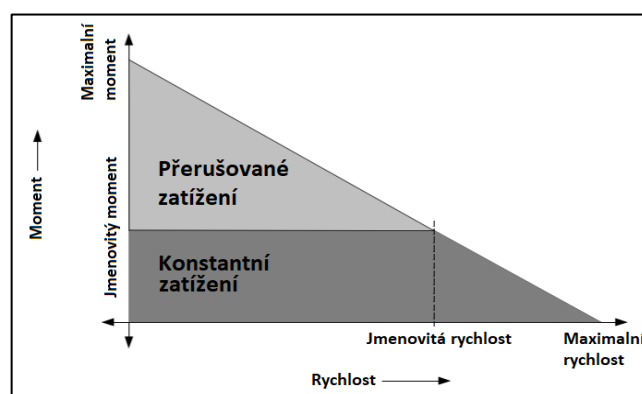
porovnání motorů s dalšími nepoužívanějšími motory, kterými jsou stejnosměrné kartáčové motory a asynchronní (indukční) motory.

Tabulka 1: Porovnání BLDC motorů s DC motory s kartáčovou komutací, převzato z: [4], upraveno autorem

Vlastnosti	BLDC motory	Kartáčové DC motory
Komutace	Elektrická komutace založena na snímání polohy například pomocí Hallových sond	Kartáčová komutace
Údržba	Méně vyžadovaná díky absenci kartáčů	Vyžadovaná pravidelná údržba
Životnost	Delší	Kratší
Otáčková charakteristika	Plochá – s jmenovitou zátěží je možné pracovat ve všech rychlostech	Mírně plochá – při vyšších rychlostech roste tření kartáčů a snižuje se využitelný moment
Účinnost	Vysoká – žádné úbytky napětí skrze kartáče	střední
Poměr výstupního výkonu a rozměrů	Vysoký – velikost je menší díky dobré tepelné charakteristice. Jelikož má BLDC motor vinutí připojené ke krytí motoru teplo se lépe rozptýlí	Střední až malý – teplo vytvořené kotvou se rozptýlí ve vzduchové mezeře.
Setrvačnost rotoru	Nízká – kvůli použití permanentních magnetů na rotoru	Vysoká
Rozsah otáček	Vysoký	Nižší – limitováno kartáčem komutátoru
Generování el. rušení	Nízké	Kartáče způsobují elektromagnetické rušení
Výrobní cena	Vyšší – použití permanentních magnetů	Nízká
Řízení	Složitě a drahé	Jednoduché a levné
Požadavky na řízení	Řízení je vždy požadováno pro běh motoru. Jeden kontrolér může být použitý pro udržování stále rychlosti i pro řízení rychlosti	Pro pevně danou rychlost není požadovaný kontrolér, je však požadován v případě požadavku na proměnnou rychlost

Tabulka 2: Porovnání BLDC motorů s indukčními motory,
převzato z: [4], upraveno autorem

Vlastnosti	BLDC motory	Indukční motory
Otáčková charakteristika	Plochá – s jmenovitou zátěží je možné pracovat ve všech rychlostech	Nelineární – nízký moment při nízkých otáčkách
Poměr výstupního výkonu a rozměrů	Vysoký – permanentní magnety umožňují stejný výkon při menších rozměrech	Střední – vinutí na rotoru i statoru
Setrvačnost rotoru	Nízká – lepší dynamická charakteristika	Vysoká – špatná dynamická charakteristika
Rozběhový proud	Jmenovitý – není zapotřebí speciální rozběhový obvod	Asi 7x větší než jmenovitý – je zapotřebí speciální rozběhový obvod. Běžně se používá přepínání hvězda – trojúhelník
Požadavky na řízení	Řízení je vždy požadováno pro běh motoru. Stejný kontrolér může být použitý pro udržování stále rychlosti i pro řízení rychlosti	Pro pevně danou rychlost není požadovaný kontrolér, je však požadován v případě požadavku na proměnnou rychlost
Skluz	Žádný skluz mezi rotorem a statorem	Rotor pracuje s nižší frekvencí než stator (skluz). Skluz roste s rostoucím zatížením



Obrázek 10: Momentová charakteristika motoru, převzato z: [4], upraveno autorem

Pro rychlostní rozsah, který začíná v nulové rychlosti a dosahuje po jmenovitou rychlost, je schopný BLDC motor poskytnout konstantní jmenovitý moment. Je zde možnost vytočit motor až na 150% jmenovité rychlosti, přičemž ale začíná klesat moment. V případě že zátěž vyžaduje časté spouštění a zastavování, nebo například častou změnu otáčení je vyžadován větší točivý moment. Ten může dosáhnout až hodnoty určitého maximálního momentu, který musí být dostačující pro překonání setrvačnosti zátěže a rotoru [4].

5 Krokové motory

Jedná se o synchronní motorky, které dosahují malých výkonů. Jsou velmi rozšířené v oblasti řídicí a regulační techniky v případech kdy je například potřeba převést hodnotu digitálního signálu na úhel natočení. Otáčení krokového motorku se uskutečňuje v krocích. Lze je použít na přesné polohování například jako polohovací mechanismus pro tiskárny, frézky apod.

Konstrukčně se dají krokové motorky rozdělit na krokové motorky s pasivním rotorem (reluktanční, či reakční), s aktivním rotorem a hybridní, jež jsou kombinací dvou předešlých typů [6].

5.1 Řízení krokových motorů

Základní rozdělení je podle napájecího zdroje, tedy zda je krokový motorek napájený unipolárně (proud jedné polarity) pro motorky s pasivním rotorem, či bipolárně (proud obou polarit) pro motorky s aktivním rotorem.

Dalším dělením je podle počtu taktu na jednu periodu přiváděných proudových impulsů, na 4 - taktní a 8 - taktní, jež jsou nejpoužívanější metody. Mohou být krokové motorky n - taktní ale obvykle se nevyskytují. S tímto dělením také souvisí, kolik je buzeno fází při jednom taktu. Mohou být motorky s buzením (magnetizací) jedné fáze a s buzením dvou fází [6].

5.1.1 Unipolární a bipolární řízení

V případě unipolárního řízení prochází proud vždy jen jedním vinutím. To znamená, že odběr takového motorku bude menší v porovnání s bipolárními motory. To má ovšem za následek i menší krouticí moment. Řízení takto napájených motorků je velmi jednoduché. Vyrábějí se integrované obvody, které zvládnou řídit i více motorů najednou [6].

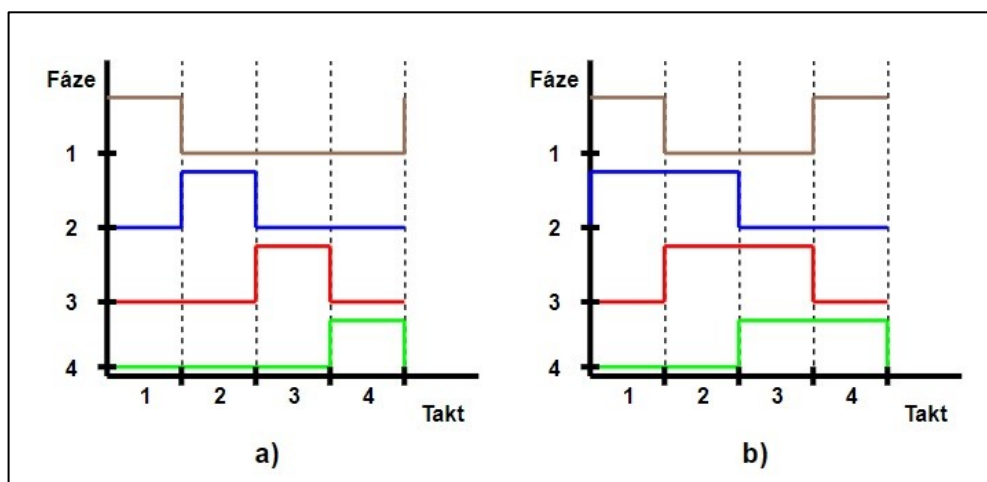
Při bipolárním řízení prochází proud dvěma protilehlými cívkami, přičemž mají navzájem opačnou polaritu. Takto řízené motorky mají větší krouticí moment než při unipolárním řízení, zvyšuje se ale i odběr. Pro řízení se využívají H – můstky [6].

5.1.2 Čtyřtaktní řízení s magnetizací jedné a dvou fází

Čtyřtaktní řízení s magnetizací jedné fáze je nejjednodušší. Využívá se u 4 - fázových reakčních motorků, nebo 2 - fázových hybridních krokových motorků, buzených unipolárně. Princip spočívá v postupném spínání jednotlivých fází statoru A, B,

C a D viz obrázek 11a), kdy ve fázi, kterou protéká proud, se vytvoří elektromagnetické pole, které přitáhne nejbližší pár pólových nastavců rotoru. Po ukončení buzení následuje buzení vedlejší fáze. Pro opačné otáčení motoru se fáze spínají v pořadí A, D, C, B a A [6].

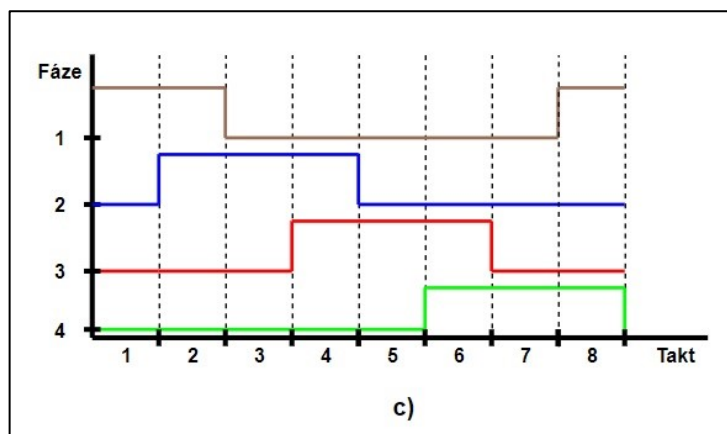
V případě řízení s magnetizací dvou fází jsou napájeny vždy dvě fáze statoru. Zde je na rozdíl od buzení jedné fáze, kdy při rovnovážné poloze jsou nastavce rotoru a statoru naproti sobě, rovnovážná poloha mezi dvěma vybuzenými pólovými nastavci, tedy v polovině kroku. Takt tomu je však i při dalších krocích, tedy velikost kroku je při magnetizaci jedné fáze a dvou fází stejná. Sled spínání fází je tedy AB, BC, CD a DA viz obrázek 11b). Pro opačný směr AD, CD, BC a AD. Při magnetizaci dvou fází se dosahuje většího vazebního momentu než při magnetizaci jedné fáze [6].



Obrázek 11: Čtyřtaktní řízení s magnetizací a) jedné fáze, b) dvou fází [6]

Osmitaktní řízení

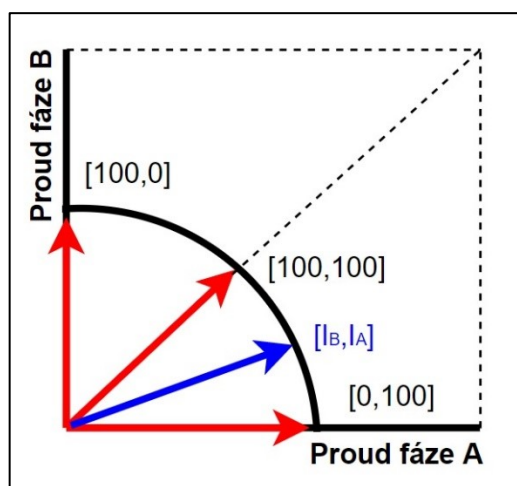
Tento způsob řízení je kombinací čtyřtaktního řízení s magnetizací jedné a dvou fází. Princip je tedy stejný, jako zde byl popsán. Buzení fází má následující posloupnost A, AB, B, BC, C, CD, D a AD. Pro opačný směr AD, D, CD, C, BC, B, AB a A. Důležité je si uvědomit, že v tomto případě je jeden krok poloviční v porovnání s čtyřtaktním řízením, a to bez změny budicího obvodu. Je však potřeba uvažovat, že jednou dochází k spínání dvou fází a následně k sepnutí pouze jedné fáze. Jak již bylo zmíněno rozdílem při spínání jedné a dvou fází je velikost vazebního momentu. Tomuto problému lze předejít úměrným snížením proudu při buzení dvou fází. To se provede na úkor budicího obvodu, ovšem problém se tím vyřeší [6].



Obrázek 12: Osmi-taktní řízení [6]

Mikrokrokování

Pro jemné rozlišení polohy, nebo při potřebě tlumení mechanických rázu lze použít mikrokrokování. Tuto metodu lze uskutečnit při buzení dvou fází, kdy je zvýšen počet kroku na otáčku a úhel otočení může činit zlomek stupně. U čtyřtakového řízení s magnetizací dvou fází se předpokládá buzení obou fází stejným proudem. Když jsou tedy velikosti budicích proudů různé a vhodně zvolené, je možné dosáhnout libovolné rovnovážné polohy. Pro počet mikrokroků jsme limitováni napájecím zdrojem, který musí být schopný poskytovat námi požadované hodnoty proudu. Je také potřeba si uvědomit, že úhel rozladění je stejný, jako pro krokování celými kroky, to znamená, že ve skutečnosti velikost úhlu mezi jednotlivými mikrokroky není zcela stejná. Při mikrokrokování dochází ke značnému snížení mechanických oscilací [6].



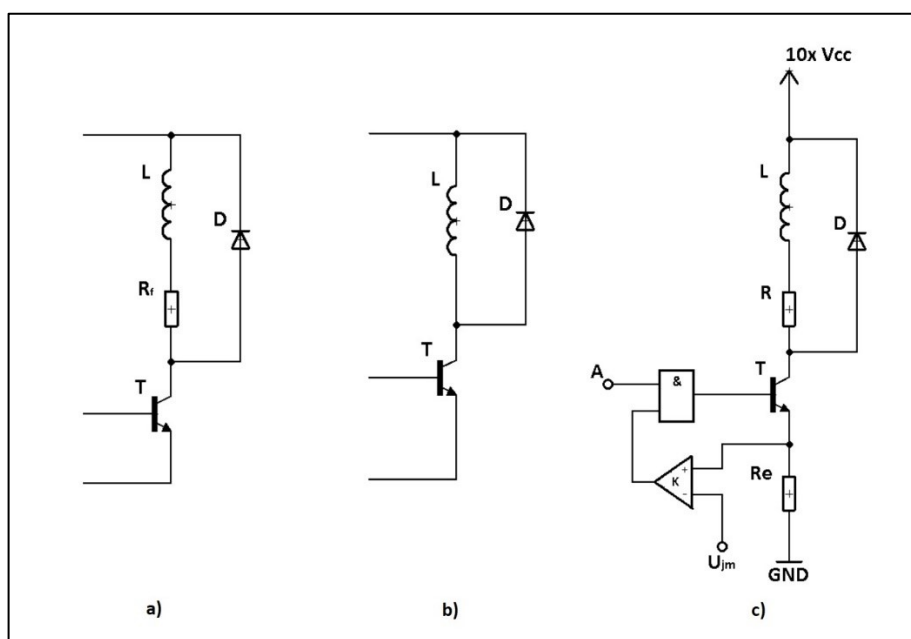
Obrázek 13: Princip mikrokrokování [6]

5.2 Budicí obvody krokového motoru

První způsob je buzení napěťovým zdrojem. Jedná se o nejjednodušší způsob buzení. Problém nastává při středních a vysokých krokovacích frekvencích, a to z důvodu vysoké časové konstanty fázového vinutí, která je dána poměrem indukčnosti a vnitřního odporu vinutí [6].

Způsobem, jak snížit časovou konstantu je zvýšení odporu předřadným odporem. Takovéto buzení se označuje jako vnuceným proudem. Díky tomu lze tento způsob buzení použít pro vyšší krokovací kmitočty, než je tomu v předchozím případě. Tento způsob buzení je však nevhodný [6].

Napěťový a proudový zdroj se pro buzení krokových motoru už příliš nevyužívá, to je zapříčiněno zavedením frekvenční modulače budicího proudu. Toto buzení se nazývá buzení pulsním proudovým zdrojem (chopper). S větším napětím se dosáhne strmějšího sklonu tečny proudu i při stejné časové konstantě. Princip tedy spočívá v přivedení napájecího napětí, které je podstatně větší než napětí jmenovité. V obvodu je zapojený tranzistor, který je řízený logickým prvkem. Logický prvek je řízený komparátorem, který porovnává stávající a jmenovitou hodnotu proudu. V případě hodnoty proudu menšího, než je jmenovitá, je tranzistor otevřen, na bázi je tedy log. 1. V případě dosažení jmenovité hodnoty proudu se tranzistor přes logický prvek uzavře [6].



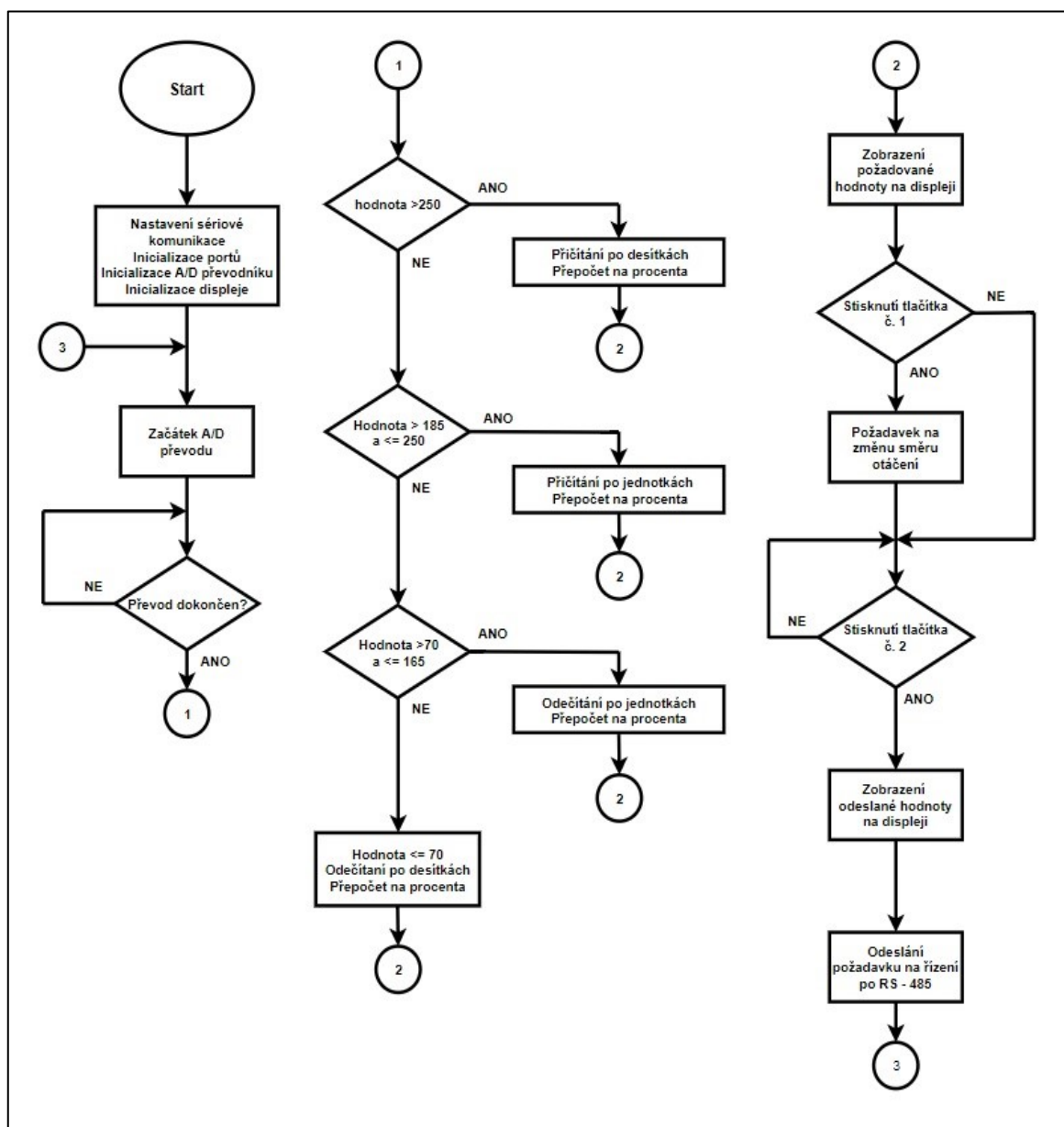
Obrázek 14: Buzení KM a) napěťovým zdrojem, b) vnuceným proudem, c) pulsním proudovým zdrojem (chopper) [6]

6 Realizace jednotky pro řízení BLDC motoru

Tato kapitola popisuje postup při realizaci řídicí jednotky. Od prvních úvah zaznamenaných fázovými diagramy až pod úryvky finálního kódu. Dále jsou zde z hardwarové stránky zmíněny prvky, které bylo potřeba uvažovat u jednotlivých modulů.

6.1 Modul pro konfiguraci řídicí jednotky

Nejprve byl vytvořen vývojový diagram, viz obrázek 15, podle kterého se postupovalo při psaní kódu.



Obrázek 15: Vývojový diagram – modul pro konfiguraci řídicí jednotky

Z obrázku 15 je patrná myšlenka při návrhu řídicí jednotky. Po připojení k napájení provede mikrokontrolér inicializaci a nastavení komunikace. Poté hned vyčká na příchozí analogovou hodnotu, kterou následně v analogově číslicovém převodníku převede na digitální signál. Po dokončení převodu následuje rozhodnutí o tom, zda bude následná změna požadované hodnoty otáček na modulu pro konfiguraci probíhat s krokem po desítkách, nebo jednotkách. Tato myšlenka i zápis kódu jsou rozebrány dále v textu. Po rozhodnutí, o jakou hodnotu se jedná, následuje zobrazení této požadované hodnoty na displeji v procentech. Dalším krokem je zjištění, zda je požadovaná změna směru otáčení, tedy zda bylo sepnuto tlačítko určené pro tento zásah. V této fázi má modul informaci o požadované hodnotě otáček i směru otáčení. Po stisknutí příslušného tlačítka se provede odeslání žádané hodnoty do řídicí jednotky. Po stisknutí tohoto tlačítka zároveň dojde k zobrazení aktuální hodnoty otáček a směru otáčení na displeji. Po dokončení se vrací cyklus k části, při které se vyčká na vstupní analogový signál.

Jako zobrazovací člen byl zvolen OLED displej s rozlišením 128x64 pixelů. K těmto displejům jsou obvykle k dispozici knihovny, ve kterých jsou definovány různé fonty pro zobrazování (velikosti, negativní zobrazování apod.). Displej komunikuje s mikročipem přes sériovou komunikaci SPI.

V dalším bodě jsem zmiňoval ovládání pomocí joysticku. Jedná se vlastně o dva trimery, kdy jeden se pohybuje v ose X, druhý v ose Y a mikrotlačítko, tedy osa Z. Při práci je využitý pouze trimer v ose Y, kdy pohybem nahoru dochází k zvyšování otáček a s pohybem dolů k snižování. Zde však nastaly komplikace, které se musely programově ošetřit. Je nutné si uvědomit, že joystick je ve výchozí poloze v polovině odporové dráhy trimerů. Jestliže pracuji s osmi bitovým mikrokontrolérem, kdy pro ovládání PWM budu mít k dispozici 255 hodnot, tak už při výchozí (nulové) poloze jsem v polovině, tedy kolem hodnoty 128. Ve skutečnosti je středová pozice okolo hodnoty 175. Další problém se ukázal při prvním zprovoznění joysticku, kdy hodnota výchozí polohy nebyla vždy stejná. Proto bylo zapotřebí vytvořit programově jakési pole necitlivosti, viz obrázek 15 a 16.

Ovládání umožňuje dvě rychlosti zvyšování, nebo snižování hodnoty otáček, kdy pomocí podmínek „If“ se zajistí pomalejší, nebo rychlejší přičítání. Tato část programu je vyobrazena v následujícím obrázku.

```

joystick = ReadADC(0)/4;

if (joystick > 250)
{
    if (procenta >= 90) procenta = 100;
    else    procenta += 10;
}
else if (joystick > 185 && joystick <=250)
{
    if (procenta >= 99) procenta = 100;
    else    procenta += 1;
}
else if (joystick > 70 && joystick <=165)
{
    if (procenta <= 1) procenta = 0;
    else    procenta -= 1;
}
else if (joystick <=70)
{
    if (procenta <= 10) procenta = 0;
    else    procenta -= 10;
}

```

Obrázek 16: Programové nastavení řízení s různými kroky přičítání

První řádek dělí výstup z A/D převodníku čtyřmi, jelikož A/D převodník je deseti bitový a rozdělí vstupní napětí na 1024 hodnot, ale mikrokontrolér je pouze osmi bitový, pracuje tedy s 255 hodnotami s uvažováním nuly.

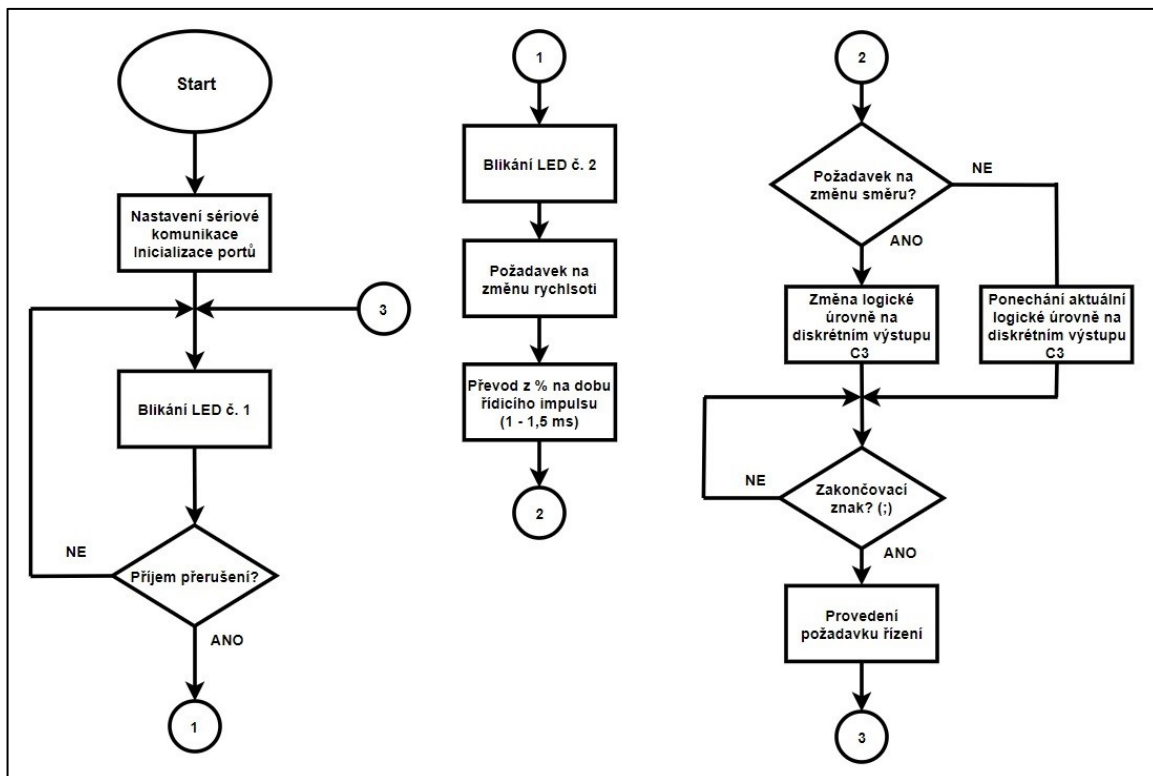
Jinak jsou podmínky poměrně jasné, když je joystick potlačen zcela nahoru, tedy přesahuje hodnotu 250, přičítají se čísla po desítkách. V případě, že je joystick v takové poloze, že je mezi horním okrajem výchozí polohy 185, ale menší, než 250, přičítají se čísla po jednotkách. Při snižování hodnoty to funguje stejně. Když je joystick mezi spodní hranici výchozí polohy 165 a hodnotou 70, odečítá se po jednotkách. V případě, že je hodnota menší než 70, joystick je tedy hodně tlačěn dolů, odečítají se desítky.

Mikrokontrolér ATmega168 komunikuje s programátorem po SPI sběrnici, je tedy zapotřebí zaimplementovat do schématu deseti pinový ISP konektor, pro programování.

Ostatní součástky jsou tlačítka, signalizační LED, předřazené rezistory nebo filtrační kondenzátory, které není nutné tady rozebírat. Poslední výrazný prvek na této desce je MAX485, což je vysílač, pro sběrnici RS – 485, která bude popsána.

6.2 Řídicí jednotka

Jedná se o modul, kdy v závislosti na přijaté hodnotě z modulu pro konfiguraci řídicí jednotky je generován PWM signál. Ovšem je zapotřebí si uvědomit, že signál PWM pro buzení výkonových prvků BLDC motorů, servomotorů, krokových motorů apod., musí splňovat určité požadavky.



Obrázek 17: Vývojový diagram - řídicí jednotka

Na Obrázku 17 se nachází vývojový diagram řídicí jednotky. Po spuštění tohoto modulu opět mikrokontrolér provádí inicializaci a nastavení komunikace. Poté se začne vykonávat nekonečná programová smyčka, která je signalizována blikající LED. Nekonečný cyklus je vykonáván tak dlouho, dokud nedojde k přijetí přerušení z modulu pro konfiguraci této jednotky. V případě, že dojde k přerušení, tedy k požadavku na změnu otáček, přestane blikat stávající LED a rozbliká se druhá. Ta bude blikat po dobu vykonávání přerušení. Tyto signalizace pomocí LED jsou velmi účinné při hledání chyb ve fázi ožívování modulu. Při přerušení je přijata hodnota, která byla v předchozím modulu přepočítaná na procenta. Tato hodnota je dále přepočítaná tak, aby výstupní signál byl impuls s časovým rozsahem od 1 ms pro 0% otáček do 2 ms pro 100% otáček. Dále se zjišťuje požadavek na změnu směru otáčení. Pokud to je vyžadováno, tak diskretní výstup,

jenž je této funkci přiřazený, změni svoji logickou úroveň. V případě, že byl i tento bod vykonán kontroluje se, zda je přítomen zakončovací znak, který je v tomto případě představuje středník. Poté dojde k požadované změně otáček.

```
ISR(USART_RX_vect) // Interrupt
{
    LED_GREENtoggle();

    unsigned char temp1, temp2;
    temp1 = RS485rx();
    temp2 = RS485rx();
    if (RS485rx() == ';')
    {
        if (temp1 <= 100)
        {
            OCR1A = (temp1 * 5) + 1000;
        }

        if (temp2 == DOPREDU)
        {
            LED_RELAYon();
        }
        else if (temp2 == DOZADU)
        {
            LED_RELAYoff();
        }
    }
    _delay_ms(100);
}
```

Obrázek 18: Kód pro přerušení

Nyní bude proveden popis kódu pro přerušení, který je vyobrazený na obrázku 18. Program řídící jednotky v základu vykonává nekonečnou smyčku. V této smyčce se nevykonává žádný program, pouze bliká LED a čeká se na přerušení. V případě přijetí přerušení se jako první provede blikání signalizační LED (v kódu LED_GREEN). Příchozí požadavek na řízení přichází ve třech bajtech. První bajt (proměnná temp1) přijímá hodnotu PWM přepočítanou na procenta. Druhý bajt (proměnná temp2) provádí změnu logické úrovně digitálního výstupu a poslední bajt je zakončovací znak, kterým je středník.

Časovač ovladače motoru s bezkartáčovou komutací je přepočítáván na šířku impulsu 1 až 1,5 ms celé periody. V předchozím bodě byl uvedený rozsah 1 ms až 2 ms, ovšem při měření po oživení odpovídalo 100% otáček 50% vyobrazených na displeji, byl tedy nutný přepočet, kdy 1 ms značí 0% otáček a 1,5 ms je pro 100% otáček. Tento přepočet se také nachází ve dvanáctém řádku na obrázku 18, kde v případě nastavení požadované rychlosti na 0% je výsledek 1000 a v případě nastavení 100% bude výsledek

1500. Následují podmínky, které pracují s proměnnou Temp2, které rozhodnou o směru otáčení v závislosti na přijatém požadavku. V případě, že se má motor točit „DOPREDU“ je logická úroveň na výstupu log. 0, v opačném případě log. 1. Poslední část přerušení je funkce pro zpoždění, nastavená na zpoždění 100 ms. Toto zpoždění se vykoná před návratem do hlavní programové smyčky.

Jedním z požadavků na řízení je změna směru otáčení motoru. V případě složitější řídicí jednotky by se to zajistilo změnou sledu spínání výkonových tranzistorů u six - step komutace. To je v tomto případě nemožné, jelikož je použita výkonová jednotka jako hotový produkt, do kterého je posílán jeden řídicí signál. Jediná možnost je v tomto případě reverzace, která je provedena prohozením dvou fází.

Ve výsledku tedy při provozu v jednom směru otáčení, bude probíhat spínání postupně první, druhé a třetí fáze. Při přepnutí kontaktu v relé je první fáze zapojená stejně a druhá fáze s třetí se zamění. Sled spínání tedy bude první, třetí fáze a druhá fáze, což když se zápis posune o krok doprava je třetí, druhá a první fáze. K této záměně fází dochází mechanickou změnou kontaktů, což je možné realizovat pomocí relé.

Relé jsou realizovány třemi základními typy, kterými jsou typ A, který představuje běžné spínací relé, dále je typ B, které je rozpínací, tedy pracuje na opačném principu než typ A. Posledním typem je typ C, což je relé přepínací. Právě typ C je použitý v této práci, kdy pro usnadnění práce je použito relé, které vnitřní strukturou odpovídá dvěma přepínacím relé. Pro reverzaci je tedy použita pouze jedna součástka. Relé nese označení TE CONNECTIVITY V23084-C2002-A403, a mělo by zvládat i proudy až 30 A.

Při návrhu desky se postupovalo obdobně, jako u předchozího modulu. Pro možnost programování je zde zapojený ISP deseti pinový konektor. Pro komunikaci po RS – 485 je použitý opět vysílač MAX485, který je ve stejném zapojení a řídí jej program daný stejnou knihovnou, jako tomu bylo v předchozí části popisující modul pro konfiguraci. Výstupní signál je zde vyvedený na tři pinový jumper. Schéma zapojení, návrhu DPS i provedené osazení se nachází v přílohách 2, 3 a 4.

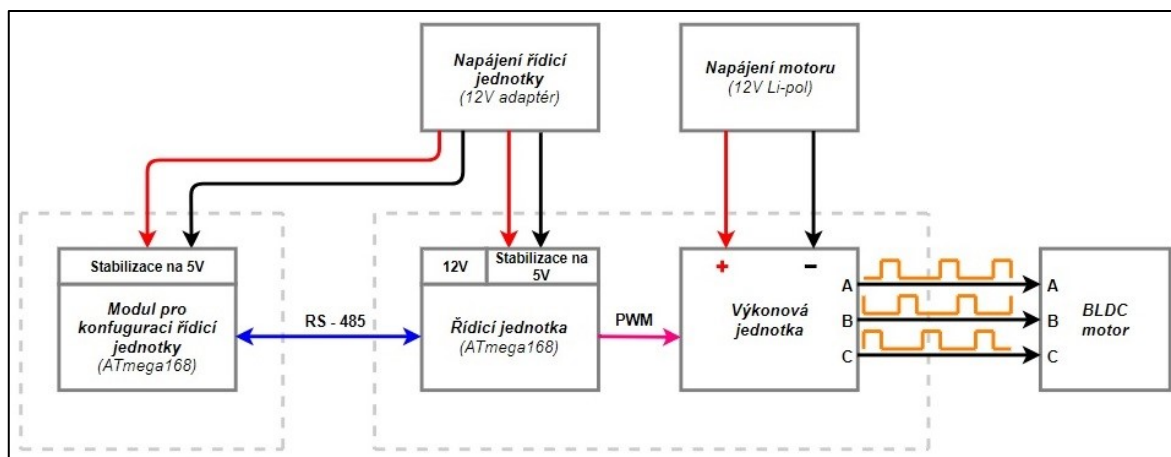
Opět se zde dále nachází signalizační LED, předřadné rezistory a filtrační kondenzátory. Dále je zde obvod pro spínání relé. Vzhledem k potřebnému napětí a proudu není možné použít relé spínat přímo z výstupu mikrokontroléru. Zapotřebí jsou dva NPN tranzistory v takovém zapojení, kdy při přivedení energie z mikrokontroléru se relé přepne. Je více způsobů, jak je možné přepínat relé pomocí tranzistorů. Po připojení řídicí jednotky je na bázi tranzistorů ihned přivedené napětí a proud, přičemž se relé sepne. V případě

přivedení napěťového signálu na vstup tranzistorů, dojde k uzemnění báze tranzistorů a relé se odepne, tedy přepne do druhé polohy, ve které setrvává, když na budicí vinutí není přivedená energie. Toto řešení spínání relé a celé schéma je k dispozici v příloze č. 2.

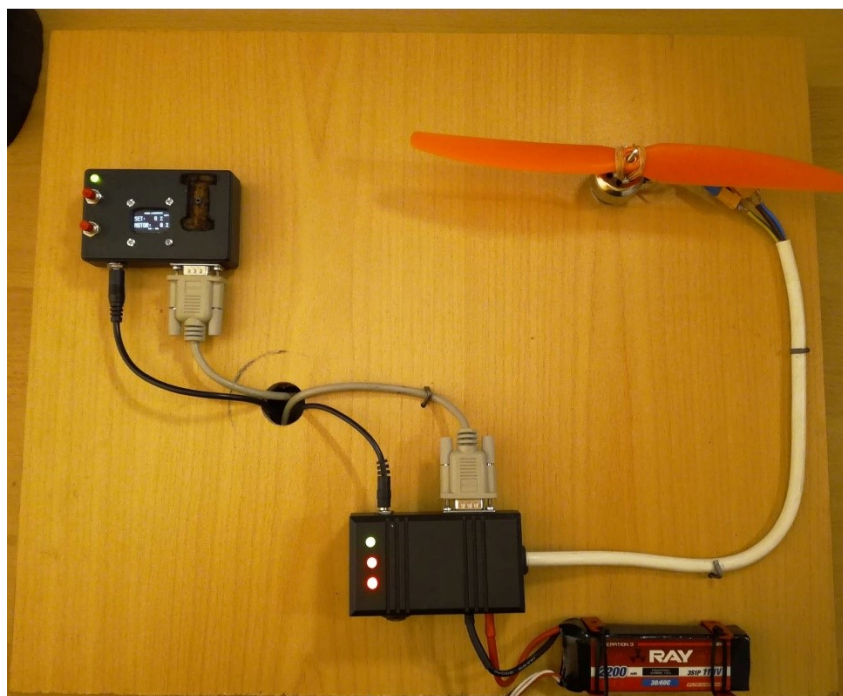
Vzhledem k velkému proudu, který může protékat, je zapotřebí volit dodatečně silné vodiče, a hlavně cesty tištěného spoje je nutné pořádně pocínovat.

7 Návrh laboratorní úlohy

Tato část se zabývá praktickou stránkou práce. Jsou zde specifikovány technické prostředky, které byly vyrobeny, nebo použity za účelem dosažení řízení motoru. Na obrázku 19 je znázorněna prvotní úvaha, jak by měla vypadat struktura přípravku pro laboratorní úlohu. Obrázek 20 ukazuje výsledek práce, kterým přípravek, na kterém zároveň bude probíhat měření.



Obrázek 19: Návrh blokového schéma zapojení pro řízení BLDC motoru



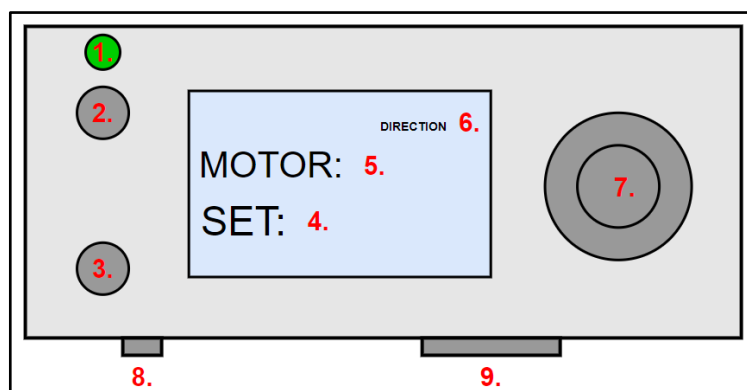
Obrázek 20: Panel pro měření vybavený vyrobenou řídicí jednotkou a modulem pro její konfiguraci

7.1 Technické prostředky

Na úvod měření je proveden popis technických prostředků. Jsou zde popsány jednotlivé části jednotky pro řízení motoru s vysvětlením, kde se nachází konkrétní části pro řízení.

7.1.1 Modul pro konfiguraci řídicí jednotky

Tato část slouží jako rozhraní mezi člověkem a motorem, tedy poskytuje možnost provádět řízení motoru v uživatelsky přívětivém prostředí. Příkladem může být virtuální panel vytvořený ve speciálních aplikacích, které jsou k tomu určeny, jako je například ControlWeb, nebo to může být zařízení jako například dotykový displej. Při návrhu jsem chtěl mít řídicí jednotku zcela nezávislou na počítači, proto je zahrani řešení řešené jako modul. Následující obrázek popisuje vytvořený modul pro konfiguraci.

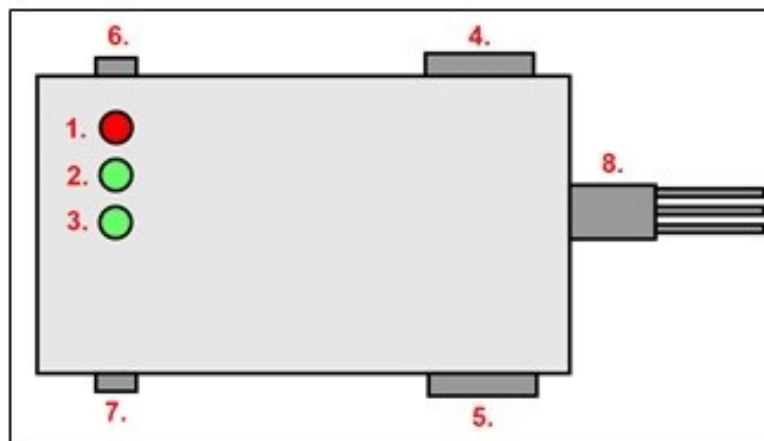


Obrázek 21: Modul pro konfiguraci jednotky

Při návrhu řídicí jednotky, která je vyobrazená na obrázku 20, se vyskytuje devět očíslovaných míst. Na pozici číslo 1 se nachází LED, která informuje, že je rozhraní připojeno ke zdroji napájení. Čísla 2 a 3 znázorňují tlačítka, kdy číslo 2 značí tlačítko pro změnu směru otáčení a číslo 3 je tlačítko pro programové zastavení motoru. V místě označeném číslem 5 se vyobrazuje nastavená hodnota, kterou uživatel bude chtít poslat do řídicí jednotky. Toto zadávání probíhá v procentech. Z bezpečnostních důvodů je změna otáček provedena až po potvrzení tlačítkem, které je k tomu přiřazené. Po potvrzení se nastavená hodnota objeví na pozici s číslem 4. Na místě označeném číslem 6 se vyobrazí, ve kterém směru se motor otáčí. K zadávání otáček jsem zvolil joystick, který je na pozici s číslem 7. Číslo 8 značí místo, pro připojení k napájení a číslo 9 značí místo pro připojení komunikace mezi modulem pro konfiguraci a řídicí jednotkou.

7.1.2 Řídicí jednotka

Řídicí jednotka je modul, který po přijetí požadavku z uživatelského rozhraní vyšle patřičný signál PWM, pro změnu rychlosti otáčení motoru do výkonové jednotky. Výkonová jednotka je součástí řídicí jednotky.



Obrázek 22: Řídicí jednotka

Pro popis řídicí jednotky je vyznačeno osm míst. Čísla 1 až 3 jsou signalizační LED. LED s číslem 1 informuje o připojení napájení, LED s číslem 2 signalizuje probíhající nekonečnou smyčku hlavního programu a LED s číslem 3 je signalizace přerušení, kdy dochází k přijímání požadavku na řízení motoru. Místo označené číslem 4 slouží k připojení modulu pro konfiguraci řídicí jednotky skrze průmyslovou komunikaci RS – 485. Čísla 5 a 6 vyznačují místa pro připojení napájení, kdy na pozici s číslem 6 je připojeno napájení DPS a na pozici s číslem 5 je připojen zdroj energie, který skrze výkonovou jednotku napájí motor. Na místě s číslem 7 se nachází vypínač a na místě s číslem 8 se nachází výstupní vedení pro připojení k motoru.

7.1.3 Použitý motor

Poháněným motorem je BLDC motor TURNIGY bell 2409 1600kv Outrunner. Tento motor se často používá v leteckém modelářství. Efektivní hodnota proudu, který motor z regulátoru odebírá je 15,5 A při napětí 12 V. V případě přetížení odebírá motor až 20 A. Tato hodnota je přijatelná jen krátkodobě, jinak dojde k nevratnému poškození.

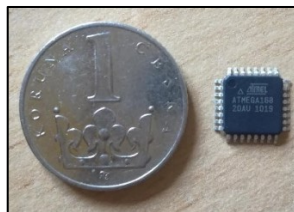
7.1.4 Mikrokontrolér Atmel ATmega168

V modulu pro konfiguraci i v řídicí jednotce je použitý tento mikrokontrolér. Při výběru čipu, na kterém je založena funkce řídicí jednotky, jsem nebyl nijak limitován speciálními požadavky. Zvolil jsem pro čip od firmy Microchip, z řady Atmel Atmega.

Firma Microchip vydala několik mikrokontrolérů, které jsou přímo uzpůsobeny pro řízení výkonových můstku BLDC motoru. Příkladem je čip ATmega32M1, který obsahuje rovnou šest výstupu s časově posunutými PWM výstupy označené PSC (z angličtiny Power Stage Control), které jsou určené pro spínání tranzistoru na výkonových můstcích měniče. Vzhledem k tomu, že součástí mé práce není výroba takového měniče, ale řídicí jednotka, k již zhotovenému výkonovému můstku, nebylo zapotřebí hledat čip s takovými prostředky.

ATmega168 je osmi bitový mikrokontrolér, který je velice rozšířený. Co do paměti je vybaven 16 kB FLASH paměti, 1 kB paměti SRAM a 512 B paměti EEPROM. Jedná se o poměrně obyčejný mikrokontrolér, který jako ostatní obsahuje několik A/D převodníků, časovače s PWM výstupy, přerušeni atd. Tento mikroprocesor je zpracován v pouzdře TQFP32, viz obrázek 23. Jedná se o technologii SMT (z anglického Surface Mount Technology), díky které se šetří místo na DPS [14].

Programování probíhalo v programu Atmel studio 6.2 a pro napsání firmwaru byl použit programovací jazyk C. K nahrání programu do čipu, se používají programátory, které jsou levné a jednoduché. Kód pro oba moduly řídicí jednotky je k dispozici v příloze č. 7. Při psaní kódu byly použity dvě knihovny. Jedna pro řízení OLED displeje, ve které byly definovány fonty pro vyobrazování textu na displeji a další knihovna sloužila pro základní nastavení SPI komunikace (nastavení Baud rate apod.). Takovéto knihovny jsou v dnešní době velice rozšířené a slouží ke zvýšení efektivity práce, kdy programátor nemusí opakovaně psát stejné kódy [15]



Obrázek 23: Mikrokontrolér Atmel ATmega 168

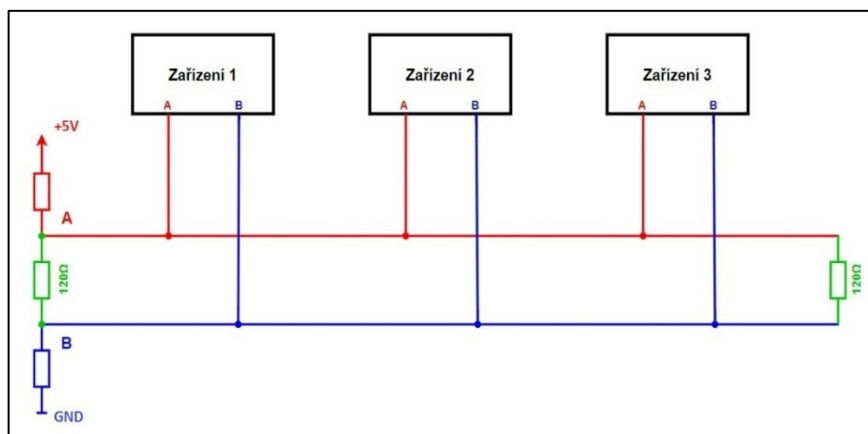
Čipy řídicí jednotky a modulu pro její konfiguraci spolu komunikují po průmyslové komunikaci RS – 485. Jedná se o průmyslovou sériovou datovou komunikaci odolnou proti rušení z okolí, která se v průmyslu hojně používá. Například průmyslové počítače, které komunikují s moduly, nebo měřicími kartami, mají přímo vyvedené připojení právě na RS – 485.

Jedná se o fyzickou vrstvu, která umožňuje komunikaci několika zařízení. Přesněji 32 zařízení, které lze připojit na jedno vedení. Délka tohoto vedení se udává v rozmezí od 1000 do 1500 metrů, nejčastěji se uvádí hodnota 1200 metrů. Je důležité brát v úvahu, že s rostoucí vzdáleností klesá rychlost toku dat. Pro krátká vedení se uvádí rychlost až 10 Mb/s [12].

Kromě zakončovacích odporů (terminátory), které mají hodnotu kolem $120\ \Omega$ a nachází se na každém konci komunikace, se zde nachází ještě pull – up a pull – down rezistory. Zapojení těchto odporů zajišťuje bezproblémové dopravení informace do místa určení. Dále v případě, že nevysílá žádný člen připojený na komunikaci, zajišťují, že se z okolí nenaindukuje rušení, které by mohlo být vyhodnoceno, jako signál [12].

Konektory použité jako připojení sběrnice RS – 485 jsou devíti pinové D-sub konektory vyvinuté firmou ITT – Cannon nesoucí označení DE – 9. Zapojeny jsou dva piny, jeden pro signál A na pinu 3, další pro signál B na pinu 8. Při komunikaci po této sběrnici není vyžadována společná zem mezi zařízeními. Tento konektor používají k připojení i rozhraní RS – 232, nebo RS – 422. Obecně se může použít jakýkoliv stíněný kroucený kabel [12].

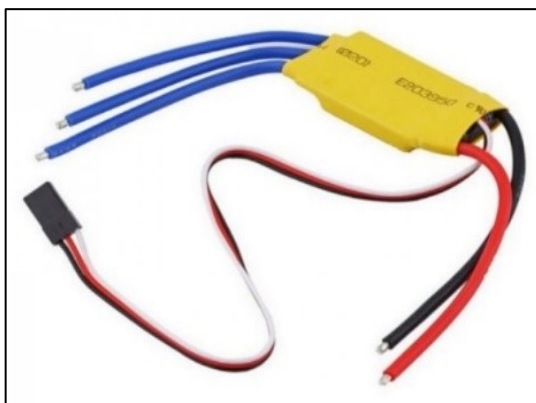
Jako vysílač, který se nachází jak na straně modulu pro konfiguraci, tak na straně řídicí jednotky je použit integrovaný obvod MAX 485.



Obrázek 24: Připojení zařízení pro komunikaci po průmyslové sběrnici RS – 485 [12]

Jako výkonový člen se v řídicí jednotce používá komerční volně prodejná výkonová jednotka. Jedná se o střídavý elektronický ovladač otáček (anglická zkratka ESC – Electronic Speed Controller). Vnitřní struktura výkonové jednotky zajišťuje potřebnou úpravu PWM signálu, kdy výstupem z regulátoru jsou tři výstupy určené pro napájení jednotlivých fází motoru. Regulátor je schopen pracovat s proudovým odběrem 30 A. Pro případ špičkového proudu může regulátor pracovat s proudovým odběrem 40 A, to však pouze zhruba po dobu 10 sekund, poté hrozí zničení výkonové jednotky.

Pro potřebnou úpravu jednotlivých PWM signálu mohou sloužit integrované obvody, kdy jeden čip poskytuje potřebné řízení pro výkonové tranzistory a zároveň přijímá signál z Hallových sond. Další způsob, je použití šesti výstupu z mikrokontroleru a programově nastavit jejich výstupní signál, aby spínání časově odpovídalo buzení jednotlivých vinutí motoru. Jiný způsob zase nabízí využití integrovaného obvodu, který je určen pro řízení jednoho ze tří půlmotů, které se na výkonové části nachází. Tím je zapotřebí tři výstupů PWM z mikrokontroléru. V této práci je použita volně prodejná výkonová jednotka, která se používá například pro RC modely letadel. Vzhledem k jednomu PWM vstupu se bude jednat o šestici tranzistorů řízených třífázovým ovladačem určeným pro řízení BLDC motorů. Použití této výkonové jednotky může snížit náklady, protože když se jedná o jednotku ke konkrétnímu motoru, mohou se na ní vyskytovat potřebné ochrany. Tento konkrétní regulátor má navíc beep kódy, pro komunikaci s uživatelem.



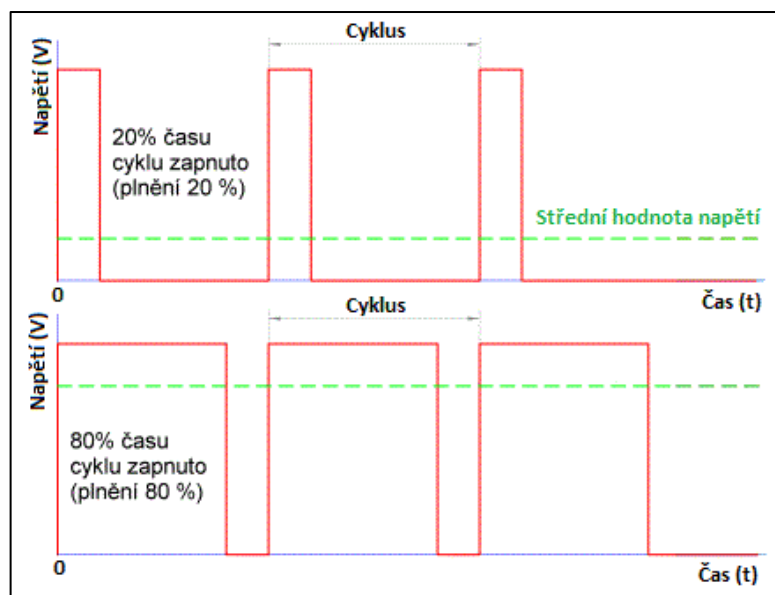
Obrázek 25: Použitá výkonová jednotka pro BLDC motor, převzato z [11]

Důležitý je řídicí signál pro tuto výkonovou jednotku. Standartní je PWM signál s frekvencí 50 – 60 Hz. Obecně platí, že šířka řídicího impulzu je od 1 ms do 2 ms. Ovšem ovladače, které se používají jako zdroj řídicího signálu, se mohou lišit a spolu s nimi i tento

časový rozsah. Může nastat případ, kdy je šířka impulzu od 0,5 ms do 2,5 ms při 60 Hz [10].

Pulsně šířková modulace je bezztrátový způsob řízení, kdy se do elektrické zátěže, kterou je nejčastěji motor, nebo zdroj světla, reguluje velikost protékajícího proudu. Princip spočívá v zapínání a vypínání stejnosměrného napětí, kdy výsledná hodnota je daná střední hodnotou právě poměrem doby zapnutí a vypnutí [10].

Pro vyjádření poměru zapnutí a vypnutí se používá pojem střída. Ta se vyjadřuje v procentech a určuje, jakou část cyklu je výstup nastavený na log. 1. Další důležitý parametr je frekvence PWM. Ta je konstantní, tedy nemění se, ale určuje, jak rychle bude docházet ke změně mezi log. 1 a log. 0 V mém případě je nastavena na 50 Hz [10].



Obrázek 26: PWM signál, převzato z [10], upraveno autorem

V celé sestavě je třeba napájet modul pro konfiguraci a řídicí jednotku napětím 5 V, napětí pro spínání relé s hodnotou 12 V a napájení motoru, které probíhá skrze regulátor. Pro splnění požadavku na napájení postačí adaptér s výstupním napětím 12 V a možností poskytnout až 4 A při odběru. Pro získání 5 V, je použit stabilizátor 7805. Pro rozvedení napětí z adaptéru do potřebných míst jsem použil napájecí rozbočovač, pro souosý konektor 5,5/2,1.

Pro napájení motoru je použita Li-pol akumulátorová sada FOXY. Jedná se o tříčlánkový akumulátor s výstupním napětím 11,1V, vybíjecím proudem až 66A

(při špičce až 132A) a kapacitou 2200 mAh. Při odběru jmenovitého proudu, který činí 15,5 A, bude Li-pol sada schopna napájet motor po dobu asi 8 minut. Při vybití bude motor postupně zpomalovat, až se úplně zastaví. Li-pol je v provedení také pro letecké modelářství, čemuž je přizpůsobený tvar a obsahuje indikátor vybití, kdy po stisknutí tlačítka může být získaná informace, že baterie je nabitá na 100 %, 60 %, 30 % nebo Low, což značí vybití.

7.2 Měření laboratorní úlohy

Řízení v procentech by mohlo vyvolat otázku ohledně velikosti otáček při určité nastavené hodnotě procent, proto je zapotřebí změřit charakteristiku použitého motoru, která bude vyjadřovat závislost mezi otáčkami motoru a nastavenými procenty v modulu pro konfiguraci.

Díky tomu, že při realizaci byly použity prostředky, které se využívají v leteckém modelářství je možné i využít pro měření techniku, která je používána v modelářství.

Pro první požadované měření, které je změření statické charakteristiky, vyjadřující závislost mezi nastavenými procenty na modulu pro konfiguraci řídicí jednotky a otáčkami motoru. Jak bylo zmíněno motor je použitý modelářský a jako zátěž má na sobě připevněny unášec s vrtulí. Pro toto měření je použitý optický tachometr, který je určený k měření otáček vrtuli RC modelu letadel a vrtulníku.

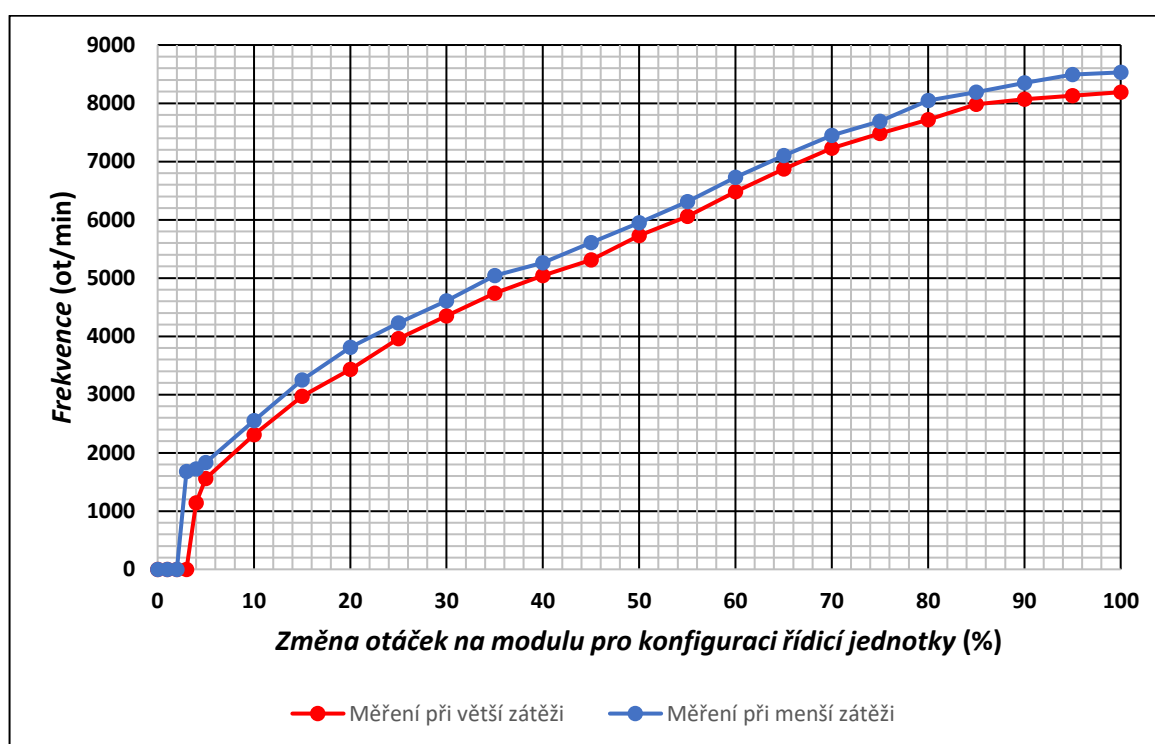


Obrázek 27: Optický tachometr použitý pro změření statické charakteristiky motoru, převzato z [12]

Měření probíhá následovně. Optický tachometr je skrze prostor, ve kterém se otáčí vrtule, orientovaný ke zdroji světla. Pomocí optického čidla se zaznamenává přerušení přívodu světla, z čehož se následně v závislosti na použité vrtuli vyhodnocuje rychlost otáčení. Na displeji se pomocí akčního tlačítka nastaví počet listů vrtule a poté se optické čidlo nasměruje na točící se vrtuli, zhruba na vzdálenost 10 centimetrů [13].

Otáčkoměr je schopný zaznamenat rychlosti otáčení až 99 999 ot/min, přičemž vždy na displeji zaznamená nejvyšší změřenou hodnotu. Tato hodnota je vyobrazena pod aktuálně měřeným údajem [13].

Nyní následuje praktické měření charakteristiky motoru, kdy při změně procentuální hodnoty na modulu pro konfiguraci motoru se změní otáčky, které jsou zaznamenány pomocí zmíněného optického tachometru. Výsledek dvou měření, kdy se použily dvě vrtule o různé velikosti za účelem získání různého zatížení motoru, je uveden na obrázku 28.



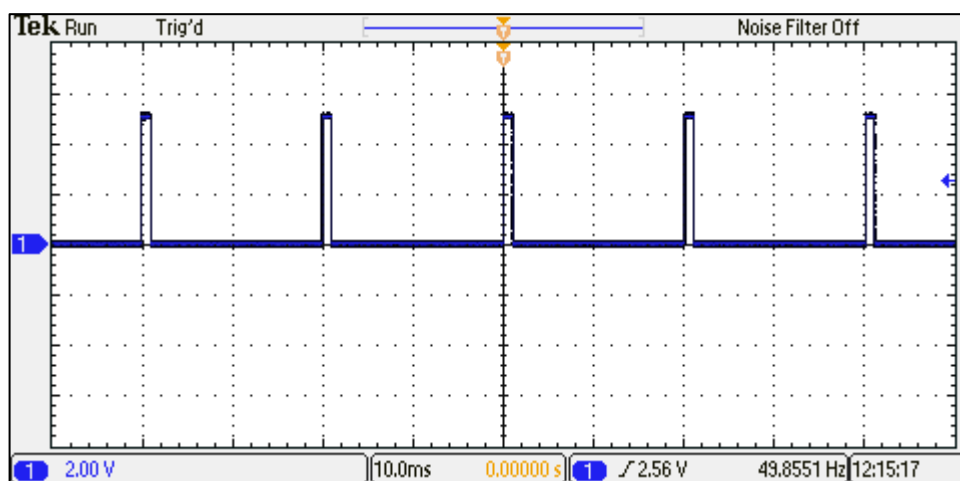
Obrázek 28: Statická charakteristika motoru vyjadřující závislost nastavené rychlosti vyjádřené v procentech na modulu pro konfiguraci otáček a frekvence

Lze si povšimnout jistého úseku necitlivosti, který se nachází do 3 % a mění se se zátěží. Elektromotory by neměly být v chodu bez zátěže, v opačném případě může dojít k nevratnému poškození motoru i okolí. V mém případě je zátěž vrtule, kdy až v nastavených 4 % se motor s větší zátěží roztočí, a to ještě s komplikacemi, při kterých dochází k výpadkům a následnému zkolabování chodu. U hodnoty 5 % je již chod bezproblémový. Tento úsek necitlivostní se mění v závislosti na použité zátěži.

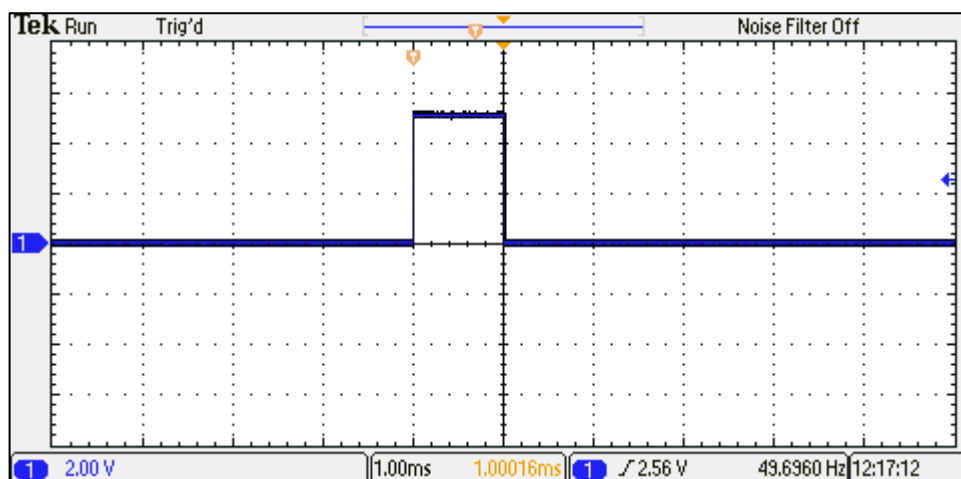
Další měření tedy bude provedeno při použití kratší vrtule, přičemž se sníží zátěž motoru a ten by měl poté dosahovat vyšších otáček. Další použitá vrtule má předepsanou velikost pro tento konkrétní motor.

Bylo zmíněno, že modelářské servomotory, krokové motory, BLDC motory apod. pracují s PWM signálem, který má frekvenci 50 Hz, tedy periodu 20ms, a že při této periodě se nastavuje doba impulsu od 1 ms (0 % PWM) do 2 ms (100 % PWM). Další měření se tedy zabývá ověřením této teorie.

Na výstupní svorky PWM signálu řídicí jednotky je připojeny osciloskop, kterým je měřena doba impulsu. Nejprve je na modulu pro konfiguraci řídicí jednotky nastavený požadavek na 0 % otáček. V tomto případě by impuls měl trvat 1 ms.



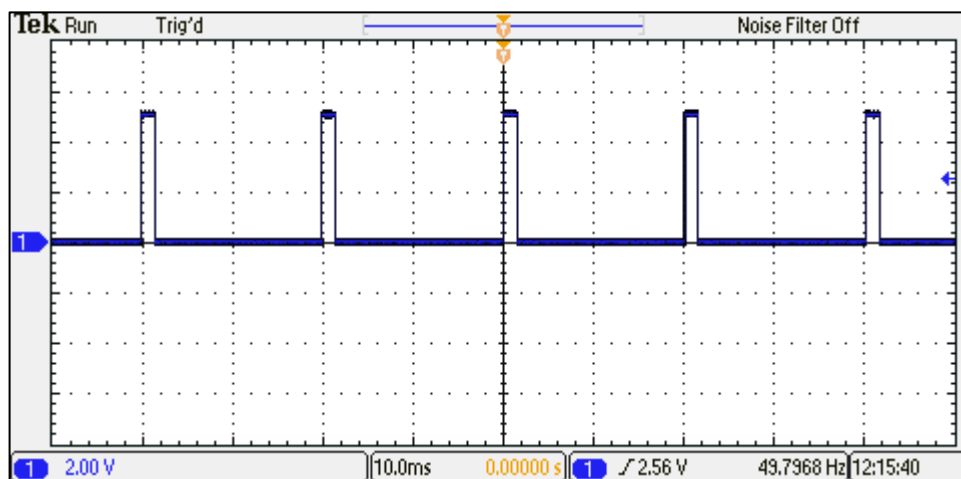
Obrázek 29: Vstupní signál výkonové jednotky pro nastavených 0% otáček



Obrázek 30: Vstupní signál výkonové jednotky pro nastavených 0% otáček - Detailní záběr pro odečtení časové hodnoty

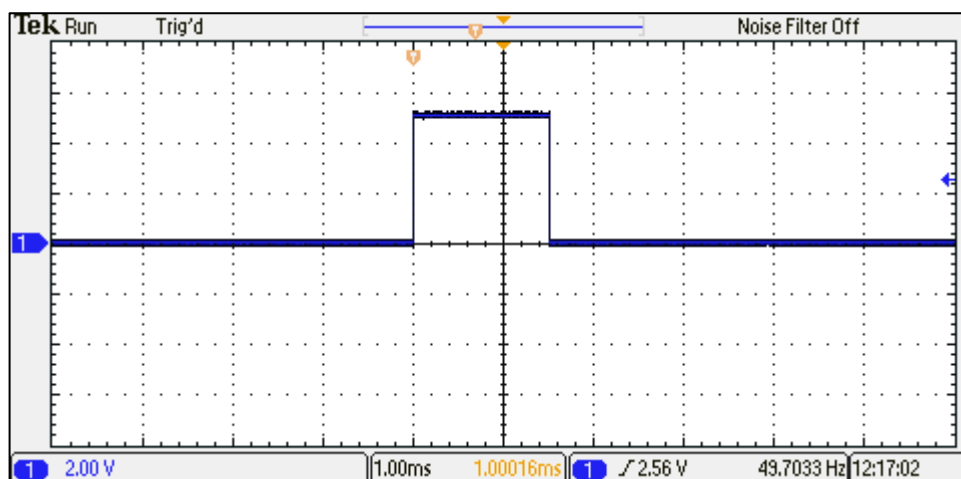
Při pohledu na obrázek 29 lze vidět ve spodní části obrázku frekvenci PWM signálu, která je s drobnou odchylkou požadovaných 50 Hz. Dále je zde uvedeno, že jeden dílek odpovídá době 10 ms. Jeden cyklus je vyobrazen na dvou dílcích, tedy 20 ms.

Obrázek 30 je zde uvedený pro odečtení doby impulsu. Je nastaveno takové rozlišení, kdy jeden dílek odpovídá 1 ms.



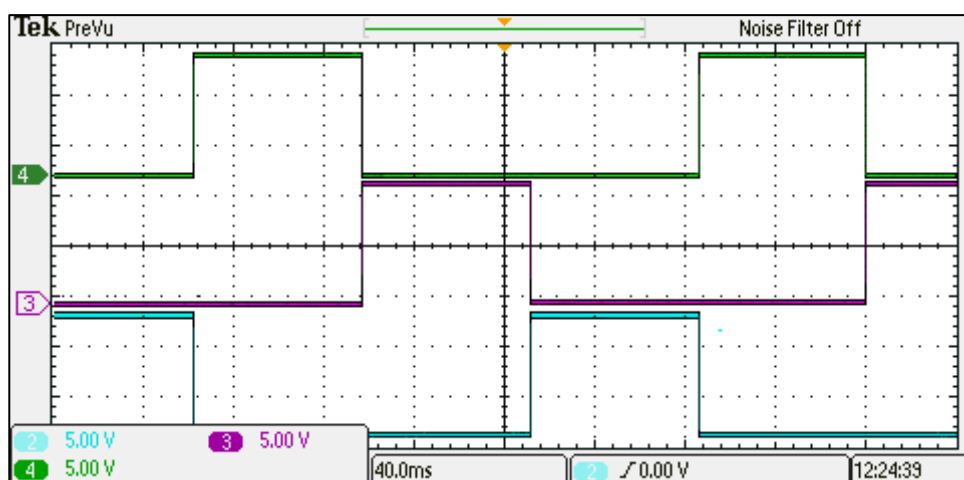
Obrázek 31: Vstupní signál výkonové jednotky pro nastavených 100% otáček

Na obrázku 31 je opět vyobrazený výstup PWM signálu, ovšem nyní při 100 % otáček. Je tedy možné vidět, že frekvence PWM signálu je po celou dobu řízení stejná.



Obrázek 32: Vstupní signál výkonové jednotky pro nastavených 100% otáček - Detailní záběr pro odečtení časové hodnoty

Obrázek 32 znázorňuje řídicí impuls pro výkonovou jednotku pro BLDC motory při nastavených 100 % na modulu pro konfiguraci řídicí jednotky. Rozlišení je opět nastaveno tak, aby jeden dílek odpovídal 1 ms. Impuls je vyobrazen na jednom a půl dílku, tedy doba neodpovídá předpokladu 2 ms při 100 % otáček, ale hodnotě 1,5 ms.



Obrázek 33: Měření výstupu všech fází výkonové jednotky

Obrázek 33 znázorňuje výstup z výkonové jednotky. Jak je možné v obrázku vidět, skutečně se jedná o tři signály (jeden pro každou fází), které jsou časově posunuty tak, aby na sebe časově navazovaly. Osa Y udává napěťovou hodnotu. V levém dolním rohu obrázku je uvedeno, že jeden dílek se rovná napětí 5 V. Rozdíl mezi log. 0 a log. 1 je zhruba dva a čtvrt dílků, což odpovídá napětí okolo 12 V.

8 Závěr a zhodnocení

Cílem této práce bylo navrhnout řídicí jednotku pro mnou zvolený motor, kterým je stejnosměrný motor s bezkartáčovou komutací, anglický označovaný jako BLDC. Tento typ motoru je v oblasti elektrických pohonů poměrně nový. Při pohledu do tabulek 1 a 2 je zjevné, že BLDC motory v mnoha ohledech vykazují lepší vlastnosti, než asynchronní motory a motory s kartáčovou komutací. Ve zkratce lze konstatovat, že BLDC motory díky použití rotoru z permanentních magnetů mají lepší dynamické vlastnosti. To je potvrzeno skutečností, že je zapotřebí kratší čas pro jeho rozběh i brždění. Jejich hlavní předností je odstranění kartáčů, které jsou normálně u stejnosměrných motorů zapotřebí pro komutaci.

Tato práce by se dala rozdělit na dvě části. První polovina práce je věnována teoretickému rozboru z oblasti elektrických pohonů. Jsou zde uvedeny základní funkční principy, výhody a nevýhody elektrických motorů vůči spalovacím a je zde dále provedeno rozdělení motoru. Podle uvedeného rozdělení se poté ubíral teoretický popis jednotlivých motorů, přičemž hlavní myšlenkou je způsob jejich řízení. Práce se nezabývá popisem funkce a struktury jednotlivých motorů, to je u každého motoru uvedeno ve stručnosti. U konkrétních motorů jsou uvedené obvody pro jejich buzení, nebo řízení otáček. Tyto obvody mohou být součástí řídicí jednotky motoru.

Druhá část se zabývá právě návrhem a realizací řídicí jednotky. Tato realizace je pospána od počátečních úvah, zaznamenaných vývojovými diagramy až po výběr konkrétních součástek, použitých při osazení desky. Na samotnou realizaci navazuje laboratorní měření. Jelikož nastavování otáček probíhá v procentech, první měření má zajistit přiřazení otáček ke konkrétním procentům, kterými se vyjadřuje požadavek na řízení. Výsledek je vyneseny formou grafu, viz obrázek 28. Měření bylo provedeno pro dvě různé zátěže. Vzhledem k použití levného optického tachometru je nutné počítat s tím, že naměřené hodnoty jsou uvedeny s odchylkou. Další měření se soustředilo na oblast řídicí jednotky. Druhým měřením byl potvrzen předpoklad o vlastnostech řídicího signálu pro výkonovou jednotku, kdy signál má frekvenci 50 Hz a šířku impulzů 1 ms až 1,5 ms, viz obrázky 30 a 32. Posledním měřením se zjišťoval tvar signálu jednotlivých fází, který vystupuje z řídicí jednotky a následně vstupuje na vinutí motoru.

Cela řídicí jednotka se skládá ze dvou částí. První část je modul pro konfiguraci, který slouží pro konfiguraci otáček řídicí jednotky, čemuž se rozumí nastavení rychlosti a směru otáčení motoru. Pro vizualizaci jsem použil OLED displej, který zobrazuje aktuální otáčky motoru vyobrazené v procentech.

Druhá část je řídicí jednotka. Ta slouží k přijetí požadavku na řízení z modulu pro konfiguraci a provede jej. Příchozí příkaz je složený ze tří bajtu. První udává rychlost otáček, druhý směr otáček a třetí je zakončovací znak. Na tomto modulu se nenachází žádné ovládací prvky, pouze signalizační. Podrobněji je to popsáno v textu vztaheném k obrázku 22.

Uživatelské rozhraní a řídicí část spolu komunikují po průmyslové sériové sběrnici RS – 485. Ta byla zvolena vzhledem k požadavku v zadání práce, kde je vyžadovaná programová podpora pro distribuované systémy řízení. Tato sériová komunikace je zcela běžně v průmyslu používána v prostředí, kde se vyskytuje rušení z okolí.

Pro úspěšné vypracování bakalářské bylo zapotřebí, abych se naučil programovat mikrokontroléry Atmel od firmy Microchip v jazyce C v programu Atmel Studio 6.2. Dále byla nutné navrhnout schéma zapojení a DPS pro dva moduly, které tvoří výslednou řídicí jednotku. Záhy došlo k jejich realizaci a oživení. Schéma, DPS, osazené desky a výpis součástek se nachází v přílohách práce tohoto dokumentu.

Tato práce by v budoucnu mohla být doplněna o další řídicí jednotky, které by spolu mohly komunikovat, díky použití průmyslové sběrnice. Dále by bylo možné vytvořit jakousi centrální jednotku, která by byla všem nadřazená a skrze kterou by se mohly ovládat konkrétní motory zapojené na sběrnici. Dalším rozšířením stávající jednotky by mohlo být vytvořením virtuálního panelu, kdy by bylo možné pomocí počítače ovládat otáčky motoru. V případě, že by se rozšiřování ubíralo tímto směrem bylo by možné vytvořit jednotku zcela nezávislou na kabeláži. Napájení by bylo možné zajistit baterii či akumulátorem a příjem signálu by mohl být prováděný bezdrátově. V dnešní době je pokrytí internetu téměř všude, bylo by to tedy možné.

Seznam použité literatury

- [1] ROUBÍČEK, Ota. Elektrické motory a pohony: příručka techniky, volby a užití vybraných druhů. Praha: BEN – technická literatura, 2004. ISBN 978-80-7300-092-9.
- [2] PAVELKA, Jiří a Jiří ZDĚNEK. Elektrické pohony a jejich řízení. 2. vydání. V Praze: České vysoké učení technické, 2015. ISBN 978-80-01-05785-8.
- [3] JAVŮREK, Jiří. Regulace moderních elektrických pohonů. Praha: Grada, 2003. ISBN 80-247-0507-9.
- [4] MICROCHIP. Brushless DC (BLDC) Motor Fundamentals. 2003, Dostupné z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/00885a.pdf>
- [5] NEBORÁK, Ivo a Václav SLÁDEČEK. Elektrické pohony [online]. Ostrava: VŠB, 2008 [cit. 2018-02-08]. ISBN 978-80-248-1493-3.
- [6] NOVÁK, Petr. Experimentální metody v mechatronice [online]. Ostrava: VŠB – Technická univerzita, 2007 [cit. 2018-02-08]. ISBN 978-80-248-1631-9.
- [7] BLDC aneb DC motor s nulovými náklady na údržbu – Časopis Elektro – Odborné časopisy. Odborné časopisy [online]. Copyright © 2014 [cit. 09.02.2018]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/elektro/casopis/tema/bldc-aneb-dc-motor-s-nulovymi-naklady-na-udrzbu--10016>
- [8] KŮS, Václav. Elektrické pohony a výkonová elektronika. Druhé vydání. Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 2016. ISBN 978-80-261-0639-5.
- [9] Hlavní druhy stejnosměrných strojů. Profielektrika [online]. Copyright © 2018 [cit. 09.05.2018]. Dostupné z: <https://elektrika.cz/data/clanky/hlavni-druhy-stejnosmernych-stroju/view>
- [10] Pulzně-šířková modulace « RoboDoupě - web nejen o robotice. RoboDoupě – web nejen o robotice [online]. Copyright © 2018 [cit. 09.05.2018]. Dostupné z: <http://robodoupe.cz/2016/pulzne-sirkova-modulace/>
- [11] 30A BLDC ESC product manual. Copyright © 2018 [cit. 15.05.2018]. Dostupné z: https://www.optimusdigital.ro/index.php?controller=attachment&id_attachment=451

- [12] Communication via the RS485 interface. Janitza electronics [online]. Copyright © 2010 [cit. 20.05.2018]. Dostupné z: <https://www.janitza.com/communication-via-the-rs485-interface.html>
- [13] Realistické RC modely – Turnigy Micro Tacho Tachometer. Realistické RC modely [online]. Dostupné z: <http://rcmodely.cevaro.sk/index.php?id=283>
- [14] MICROCHIP. ATmega48/V / 88/V / 168/V. 11/2016, Dostupné z: http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-2545-8-bit-AVR-Microcontroller-ATmega48-88-168_Datasheet.pdf
- [15] Basic UART functions for AVR MEGA. Atmel knihovny [online]. Dostupné z: <https://github.com/lherudek/AVR-UART>

9 Přílohy

Příloha č. 1: Schéma zapojení modulu pro konfiguraci řídicí jednotky

Příloha č. 2: Schéma zapojení řídicí jednotky

Příloha č. 3: Návrh DPS

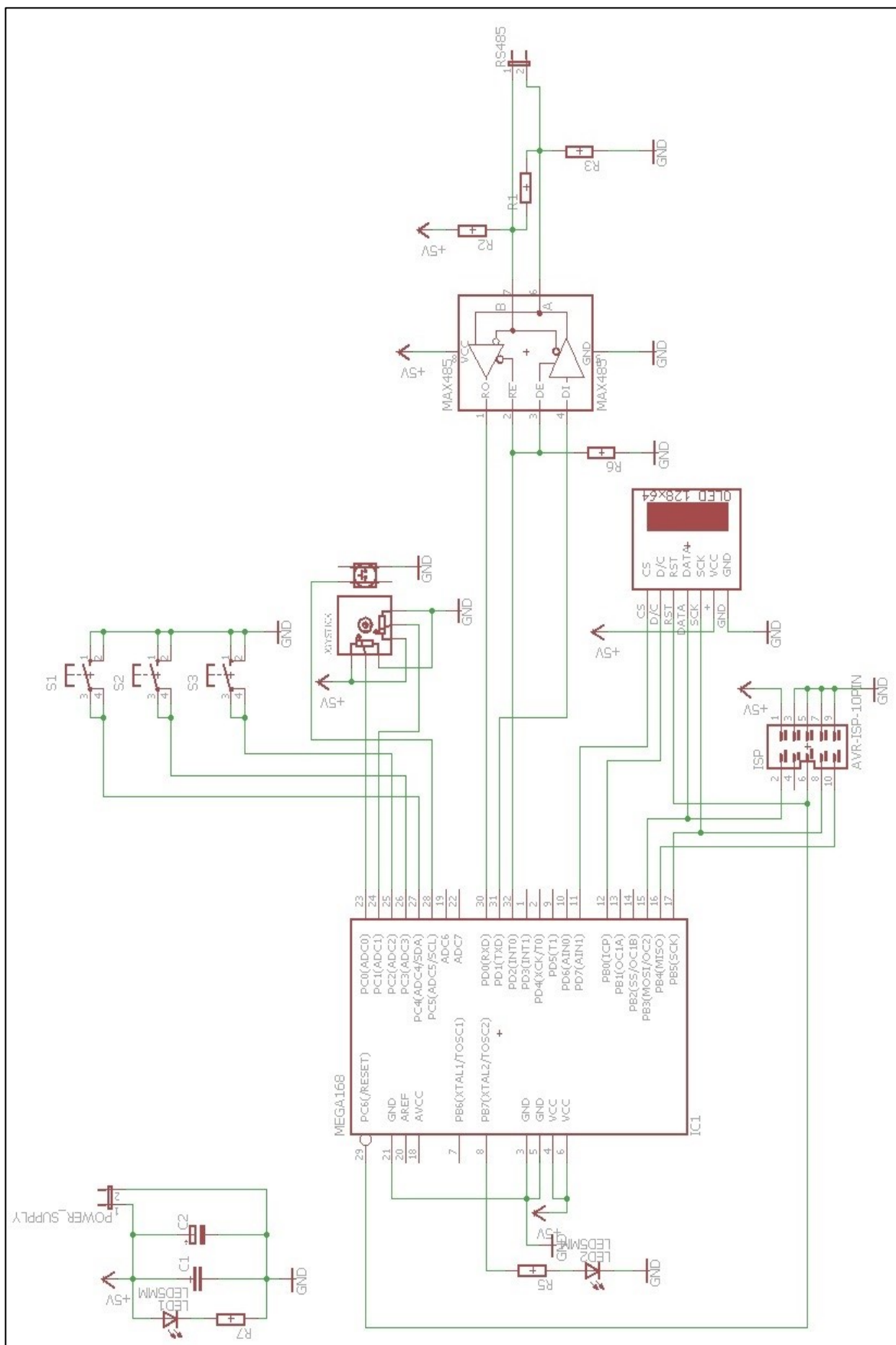
Příloha č. 4: Osazení DPS

Příloha č. 5: Seznam součástek

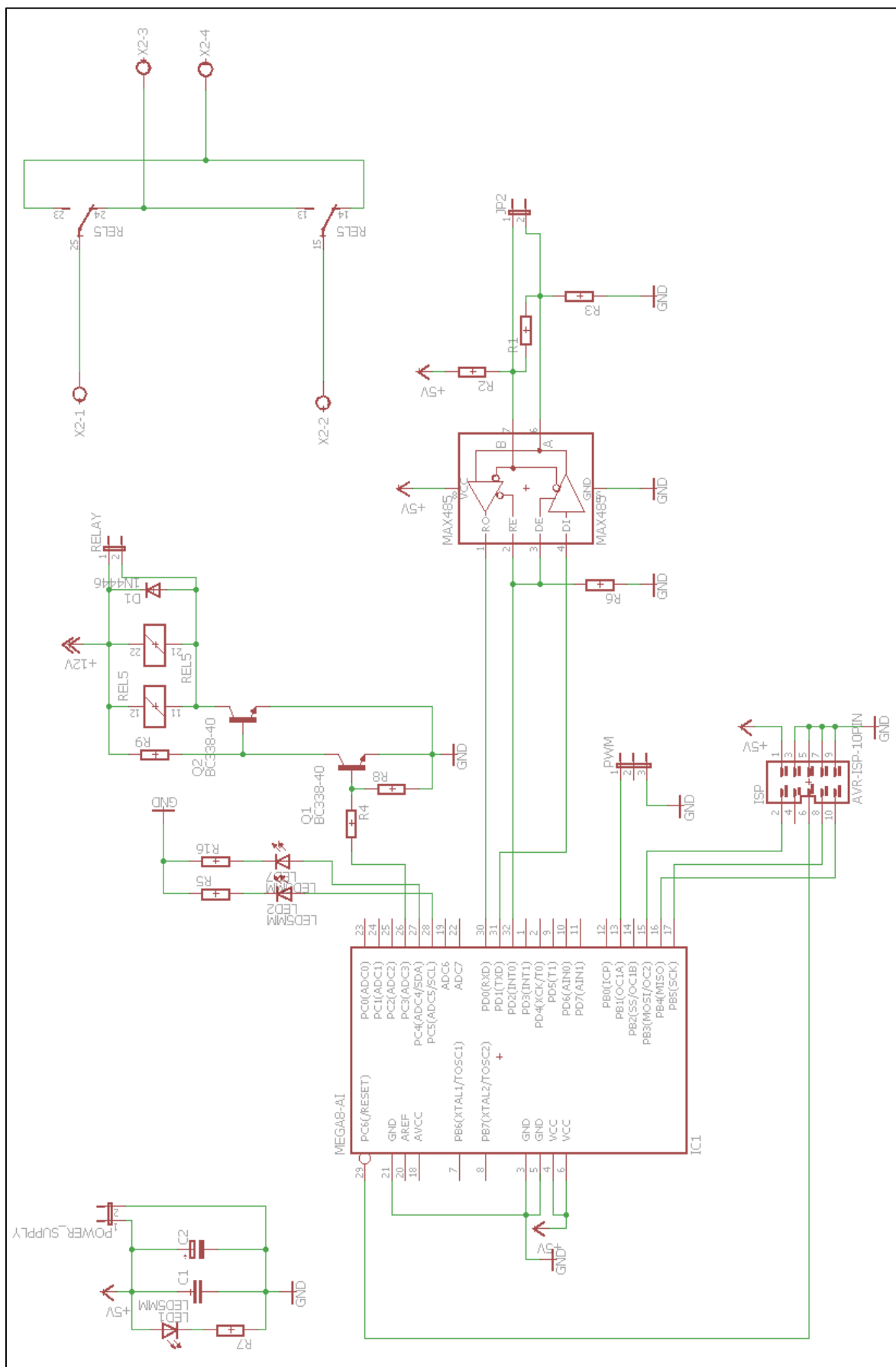
Příloha č. 6: Schéma navržených desek v elektronické podobě (EAGLE 7.5.0)

Příloha č. 7: Zdrojové texty v elektronické podobě (Atmel studio 6.2)

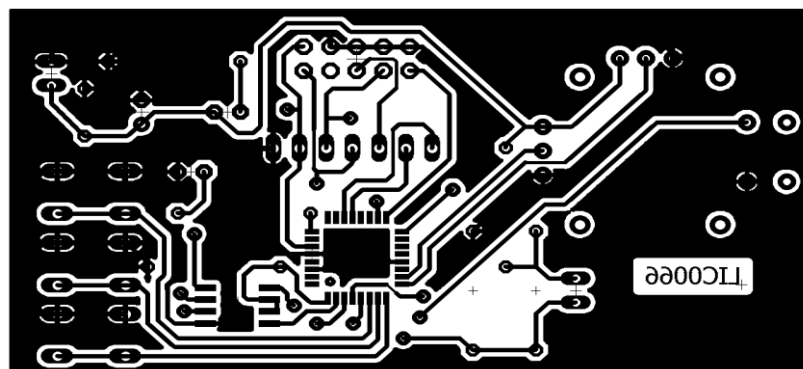
Příloha č. 1: Schéma zapojení modulu pro konfiguraci řídicí jednotky



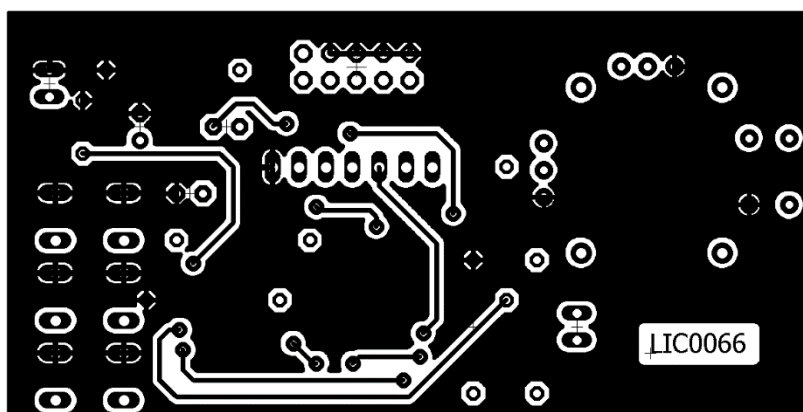
Příloha č. 2: Schéma zapojení řídicí jednotky



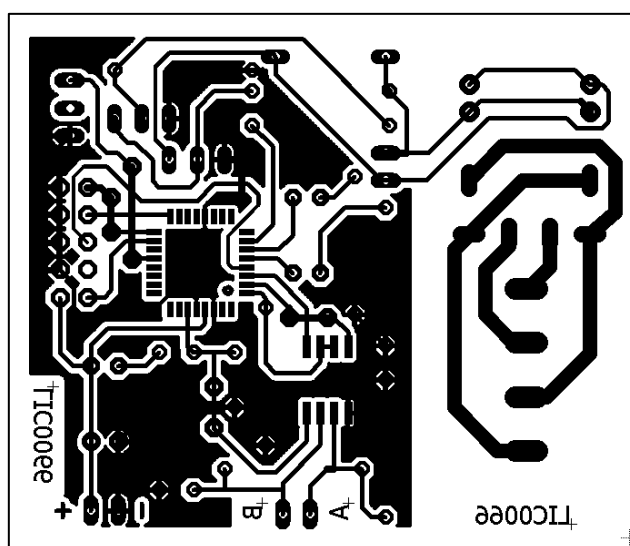
Příloha č. 3: Návrh DPS



BOTTOM view (spodní strana) DPS řídicí části

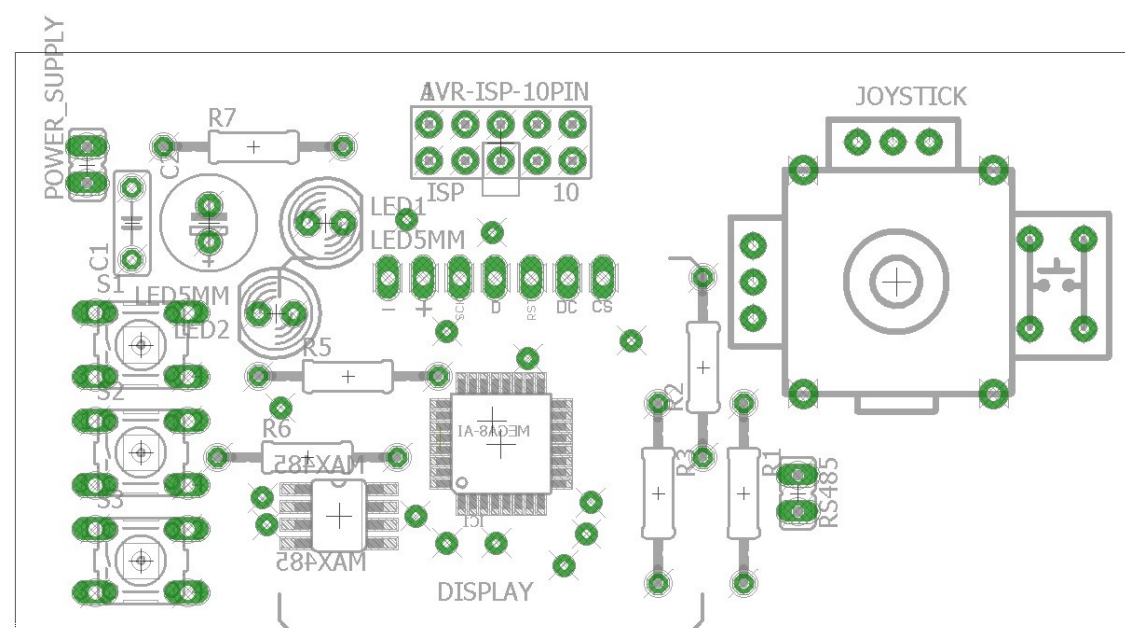


TOP view (horní strana) DPS řídicí části

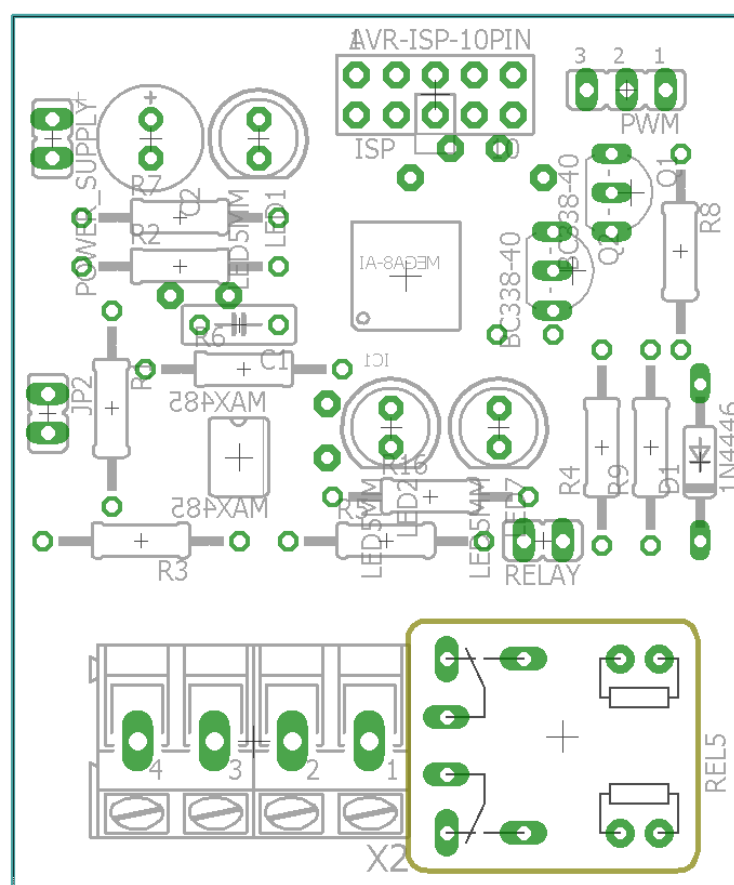


BOTTOM view (spodní strana) DPS uživatelského rozhraní

Příloha č. 5 Osazení DPS



Osazená DPS modulu pro konfiguraci řídicí jednotky



Osazená DPS řídicí jednotky

Příloha č. 6: Seznam součástek

Part	Value	Device	Package
C1	100nF	C-EU050-025X075	C050-025X075
C2	10uF	CPOL-EUE2.5-7	E2,5-7
IC1	MEGA8-AI	MEGA8-AI	TQFP32-08
ISP	AVR-ISP-10PIN	AVR-ISP-10PIN	AVR-ISP-10PIN
JOYSTICK	JOYSTICK	JOYSTICK	JOYSTICK
LED1	LED5MM	LED5MM	LED-5MM
LED2	LED5MM	LED5MM	LED-5MM
MAX485	MAX485	MAX485	S008
POWER_SUPPLY		JP1E	JP1
R1	120R	R-EU_0207/12	0207/12
R2	1,2k	R-EU_0207/12	0207/12
R3	1,2k	R-EU_0207/12	0207/12
R5	330R	R-EU_0207/12	0207/12
R6	10k	R-EU_0207/12	0207/12
R7	330R	R-EU_0207/12	0207/12
RS485		JP1E	JP1
S1		10-XX	B3F-10XX
S2		10-XX	B3F-10XX
S3		10-XX	B3F-10XX
DISPLAY		OLED_64X128	OLED_64X128

Seznam součástek modulu pro konfiguraci řídicí jednotky

Part	Value	Device	Package
C1	100nF	C-EU050-025X075	C050-025X075
C2	10uF	CPOL-EUE2.5-7	E2,5-7
D1	1N4446	1N4446	D035-10
IC1	MEGA8-AI	MEGA8-AI	TQFP32-08
ISP	AVR-ISP-10PIN	AVR-ISP-10PIN	AVR-ISP-10PIN
JP2		JP1E	JP1
LED1	LED5MM	LED5MM	LED-5MM
LED2	LED5MM	LED5MM	LED-5MM
LED7	LED5MM	LED5MM	LED-5MM
MAX485	MAX485	MAX485	S008
POWER_SUPPLY		JP1E	JP1
PWM		JP2E	JP2
Q1	BC338-40	BC338-40	T092-EBC
Q2	BC338-40	BC338-40	T092-EBC
R1	120R	R-EU_0207/12	0207/12
R2	1,2k	R-EU_0207/12	0207/12
R3	1,2k	R-EU_0207/12	0207/12
R4	30M	R-EU_0207/12	0207/12
R5	330R	R-EU_0207/12	0207/12
R6	10k	R-EU_0207/12	0207/12
R7	330R	R-EU_0207/12	0207/12
R8	Neosazeno	R-EU_0207/12	0207/12
R9	2,7k	R-EU_0207/12	0207/12
R16	330R	R-EU_0207/12	0207/12
REL5		DS_V23084-X0000-A001	DS_V23084-X0000-A001
RELAY		JP1E	JP1
X2		AK300/4	AK300/4

Seznam součástek řídicí jednotky